NEUROCIENCIA
Imágenes cerebrales contra la depresión

ASTRONOMÍA
TESS: a la caza de planetas habitables

MEDICINA
Hacia una nueva reproducción asistida

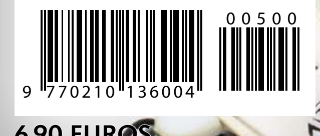


Mayo 2018 InvestigacionyCiencia.es

ROBOTS QUE APRENDEN COMO NIÑOS

Los primeros androides que imitan a los bebés muestran sorprendentes capacidades autodidactas

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
ROBOTS AUTODIDACTAS | NEUROIMÁGENES CONTRA LA DEPRESIÓN | REPRODUCCIÓN ASISTIDA
N.º 500
MAYO 2018



6,90 EUROS



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Mayo 2018, Número 500

ARTÍCULOS

BERNARD RADVANER, GETTY IMAGES



10



50



85

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Los bebés aprenden sobre el mundo a través del juego y de la interacción de su cuerpo con el entorno. Los primeros androides programados para actuar de esa manera están demostrando una sorprendente capacidad para adquirir por sí solos algunos aspectos del lenguaje e incluso ciertas facultades sociales elementales. Además de revolucionar la inteligencia artificial, estos estudios están aportando una nueva visión del desarrollo infantil. Fotografía de Sun Lee.





Enero 2018

LISTER Y LA ANTISEPSIA

«Cuando la anestesia transformó la cirugía» [por Lindsey Fitzharris; Investigación y Ciencia, enero de 2018], un extracto del libro *De matasanos a cirujanos* (Debate, 2018), termina con un merecido reconocimiento a Joseph Lister por haber entendido y combatido la infección posoperatoria. Sin embargo, resulta problemático no mencionar el descubrimiento previo de la antisepsia por parte del húngaro Ignaz Semmelweis. Lamentablemente, se ha convertido en una costumbre culpar a aquellos pioneros irritables y seguros de sí mismos del fracaso de sus coetáneos a la hora de saber ver su genio. La trágica demora en la implantación de la antisepsia debería recordarnos nuestra obligación de ver la verdad tal y como es, con independencia de las sutilezas sociales del genio creativo.

Jeff Freeman
Rahway, Nueva Jersey

Responde Fitzharris: *Las ideas nunca nacen del vacío, y la vida de Lister da buena fe de esa verdad. Mi libro analiza las contribuciones tanto de Semmelweis como de muchos otros médicos de su tiempo. Dicho esto, los métodos y las teorías de Semmelweis ejercieron poco impacto en la comunidad médica de la época. Lister visitó una clínica en Budapest en la que poco antes había trabajado el atribulado médico y su conclusión fue la siguiente: «Nunca se me mencionó el nombre de Semmelweis, el cual parece haber sido olvidado por completo tanto en su ciudad natal como en el resto del mundo». Por otro lado, cabe señalar que la contribución de Lister no fue su descubrimiento de la antisepsia, sino más bien su aplicación de la teoría de los gérmenes a la práctica médica a través de la aplicación sistemática de la antisepsia.*

FERMI, ANTIMATERIA Y ESTRELLAS DE QUARKS

El artículo «Una nueva imagen del universo violento» [por Alberto Domínguez; Investigación y Ciencia, marzo de 2018] habla sobre los últimos hallazgos del telescopio Fermi, el observatorio espacial de rayos gamma de la NASA. Hace unos años, los satélites Compton (NASA) e Integral (ESA) concluyeron que en el centro de la Vía Láctea habría una nube de positrones, las antipartículas del electrón. ¿Han permitido las observaciones de Fermi obtener nueva información al respecto?

Por otro lado, uno de los objetos de estudio de Fermi son las estrellas de neutrones. ¿Podrían los datos del telescopio obtener algún indicio sobre la existencia de las hipotéticas «estrellas de quarks»?

Por último, ¿qué tipo de observatorio se prevé que sustituya a Fermi cuando este llegue al final de su vida útil?

Juan Torras Suriol
Terrassa

Responde Domínguez: *Todas las preguntas son muy interesantes. Como bien señala el lector, desde hace unos 40 años se conoce la existencia de una línea de emisión difusa a 511 kiloelectronvoltios (keV) en la dirección del centro de nuestra galaxia (dicha energía coincide con la asociada a la masa del electrón, por lo que apunta a la desintegración de electrones y positrones). Sin embargo, Fermi es sensible a fotones gamma con energías superiores a los 100.000 keV, por lo que no ha podido obtener nueva información al respecto. Pero hay buenas noticias: se están diseñando nuevas misiones gamma de baja energía que podrían lanzarse en un futuro si consiguen financiación. Se trata de las misiones e-Astrogam, de la ESA (eastrogam.iaps.inaf.it), en la cual participa nuestro grupo de la Universidad Complutense de Madrid, y AMEGO, de la NASA (asd.gsfc.nasa.gov/amego). Ambas serán sensibles a líneas de 511 keV y sin duda estudiarán el problema en detalle.*

El estudio de las hipotéticas estrellas de quarks es complicado porque necesitamos relacionar de alguna forma lo que detectan nuestros instrumentos (flujo de fotones, periodicidad de la señal, etcétera) con la composición de las estrellas, lo cual no es sencillo. Hay hipótesis que relacionan un extraño fenómeno que observamos en algunas estrellas, y que en inglés se conoce como glitch *(«fallo»), con la posibilidad de que tales astros estén compuestos de quarks, si bien existen explicaciones alternativas relacionadas con alteraciones en el campo magnético del objeto. Estos* glitches *consisten en cambios bruscos e intensos en la frecuencia de rotación de algunos tipos de púlsares. En general, debido a las características de los instrumentos actuales, resulta más conveniente estudiar tales fenómenos en ondas de radio que en rayos gamma.*

Fermi cumplirá diez años de misión este verano. La situación actual de financiación es buena: hay fondos disponibles para todo 2018 y posiblemente hasta final de 2020, tras varios informes positivos por parte de las agencias. Y esperamos que la misión pueda extenderse aún más, ya que los instrumentos están funcionando a la perfección. No hay ninguna otra misión de la que yo tenga conocimiento que pueda sustituir a Fermi en su banda de energía. De entre las planeadas, las más similares son las mencionadas e-Astrogam y AMEG, cuyo límite superior de energía posiblemente se solapará con las energías más bajas a las que Fermi-LAT es sensible.



Marzo 2018

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:

PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



UN TRABAJO RECIENTE ha propuesto una técnica para detectar la presencia de cordilleras como el Himalaya en mundos distantes. Esta recreación artística muestra las formaciones montañosas de una hipotética luna del planeta HD188753 (*izquierda*), un gigante gaseoso con tres soles situado a unos 150 años luz del sistema solar.





NASA/LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO/INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE CALIFORNIA

EXOPLANETAS

Everests de otros mundos

Un estudio argumenta que los futuros telescopios gigantes podrían detectar la presencia de grandes formaciones montañosas en planetas lejanos

El Himalaya distorsiona el contorno de la Tierra más o menos en la misma medida que un cabello humano el de una bola de billar. Así pues, podría parecer imposible descubrir una protuberancia semejante en un planeta que orbita alrededor de una estrella lejana. En un trabajo reciente, sin embargo, dos astrónomos han propuesto un método para detectar montañas y otros accidentes superficiales en exoplanetas.

Según Moiya McTier, estudiante de doctorado de la Universidad de Columbia y una de las autoras del artículo, publicado en abril en la revista *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, encontrar montañas podría contribuir, además, a abordar otra pregunta clave: ¿son habitables esos planetas?

La vida en la Tierra parece depender entre otros factores de la dinámica interior del planeta. La tectónica de placas recicla el carbono y regula la temperatura, y el campo magnético (debido a la acción del núcleo terrestre) proporciona un escudo contra el peligroso viento solar y otros tipos de radiación provenientes del espacio. Las montañas y los volcanes son signos de que un planeta posee, o al menos poseyó en algún momento, esa clase de dinámica interna.

En la actualidad se conocen unos 3700 planetas, aunque en líneas generales los astrónomos no saben mucho acerca de ellos más allá de sus dimensiones, su masa y algunos parámetros orbitales. La mayoría se han detectado mediante el llamado «método de los tránsitos», el cual consiste en medir la ligera atenuación en el brillo de una estrella que tiene lugar cuando un planeta que orbita a su alrededor pasa por delante [*véase* «Sombras de otros mundos», por Joshua N. Winn, *en este mismo número*]. La estrategia planteada por McTier y su colaborador David Kipping, también de la Universidad de Columbia, se basa asimismo en dicha técnica, aunque probablemente requerirá enormes telescopios que podrían tardar decenios en estar disponibles.

La propuesta se asienta en la idea de que la silueta de un planeta montañoso y en rotación debería cam-

biar durante el tránsito, lo que haría que fluctuasen las mediciones relativas a la disminución de brillo. A partir de varias estimaciones prudentes, los autores concluyen que sería posible medir la irregularidad superficial de un planeta tan montañoso como Marte con un telescopio de 74 metros que observara sus tránsitos durante aproximadamente 20 horas distribuidas a lo largo de unos seis meses. Un instrumento así queda sin duda muy lejos de los actuales, si bien ya hay propuestas para construir telescopios aún mayores.

Una de las principales preocupaciones de Kipping con relación a este método es que la existencia de nubes podría enmascarar cualquier accidente montañoso. Nicolas Cowan, astrónomo de la Universidad McGill que no participó en el estudio, es de la misma opinión. Este experto considera además que, incluso en ausencia de nubes, la refracción, la dispersión y la absorción atmosféricas de la luz podrían dar al traste con ese tipo de observaciones. «Me temo que, para que el método funcionase, el planeta probablemente tendría que carecer por completo de atmósfera», argumenta. Los autores, por su parte, creen que tales efectos podrían mitigarse analizando el comportamiento de la luz en diferentes longitudes de onda.

En todo caso, aun cuando se confirmase la existencia de irregularidades en un planeta, los científicos necesitarían información adicional a la hora de evaluar su habitabilidad, como la presencia de agua líquida, temperaturas tolerables o una atmósfera. «Ningún dato por sí solo va a darnos la respuesta», concluye Kipping.

—Bob Henderson

FISIOLOGÍA VEGETAL

Hacer frente a las olas de calor

Una especie de eucalipto resiste al calor extremo transpirando más

Las temperaturas alcanzadas el último verano en algunas partes de Australia fueron lo bastante altas como para derretir el asfalto. Con el calentamiento global en franco avance y las olas de calor y otros fenómenos climáticos en alza, existe el riesgo de que muchas plantas no puedan soportar las nuevas condiciones. Pero al menos una especie de eucalipto resiste el calor tórrido siguiendo transpirando cuando algunos otros procesos esenciales quedan en suspenso, señala un estudio novedoso.

Cuando las plantas convierten la luz solar en nutrientes mediante la fotosíntesis, absorben el dióxido de carbono a través de los estomas (poros) de sus hojas. Estos desprenden asimismo agua por transpiración, proceso que hace circular los nutrientes por todo el vegetal y contribuye a enfriarlo gracias a la evaporación. Ahora bien, es sabido que las temperaturas excepcionalmente altas reducen la fotosíntesis —y la mayoría de los modelos vegetales estudiados indican que también la transpiración—, lo cual expone a los árboles a un peligroso sobrecalentamiento. Dada la dificultad que entraña controlar y modificar las condiciones de los árboles en su entorno natural, se sabe poco sobre el modo en que cada especie afronta esta situación.

El ecólogo John Drake, del Colegio de Ciencias Ambientales e Ingeniería Forestal de la Universidad Estatal de Nueva York, y sus colaboradores cultivaron 12 eucaliptos de Parramatta (*Eucalyptus parramattensis*) en la localidad australiana de Richmond durante un año. Los hicieron crecer dentro de invernaderos individuales con ambiente controlado y rodeados de bosque: seis a temperatura ambiente y los otros seis a una temperatura tres grados centígrados más alta. Los investigadores extrajeron el agua superficial del suelo de todos los árboles durante un mes con el fin de simular una sequía leve y, acto seguido, provocaron una ola de calor abrasadora por espacio de cuatro días: elevaron la temperatura máxima hasta los 44 °C en la mitad de los invernaderos (tres expuestos hasta entonces a la temperatura ambiente y otros tantos a la temperatura cálida).

La fotosíntesis casi se detuvo en seco en los árboles que soportaron esa ola artificial de calor. Pero para su sorpresa, siguieron transpirando con niveles casi normales, con lo que lograron mantenerse relativamente frescos, tanto ellos como su entorno inmediato. Los árboles que habían crecido en las condiciones cálidas lo soportaron tan bien como los demás, y las tasas fotosintéticas retornaron a la normalidad una vez acabada la ola de calor, según han descrito Drake y sus colaboradores en febrero en *Global Change Biology*.

Los investigadores creen que los eucaliptos de Parramatta lograron mantener la transpiración, aún sin actividad fotosintética, gracias a su eficacia a la hora de extraer agua de las capas profundas del suelo. Pero si una ola de calor y una sequía severa llegaran a coincidir y el agua freática desapareciera, podrían no tener tanta suerte, advierte Drake.

Otros especialistas califican el hallazgo como alentador. «Sin duda es una buena noticia», opina Trevor Keenan, ecólogo del Laboratorio Nacional Lawrence de Berkeley, que no ha formado parte del estudio. «Sería muy interesante saber cómo se traduce esto en otras especies», añade. Drake espera llevar a cabo experimentos similares con árboles de Norteamérica. *—Yasemin Saplakoglu*



EUCALIPTOS de Parramatta en invernaderos estancos de clima controlado.

MARK G. TJOELKER, UNIVERSIDAD OCCIDENTAL DE SÍDNEY

EDUCACIÓN

Cultura científica y aceptación de la evolución

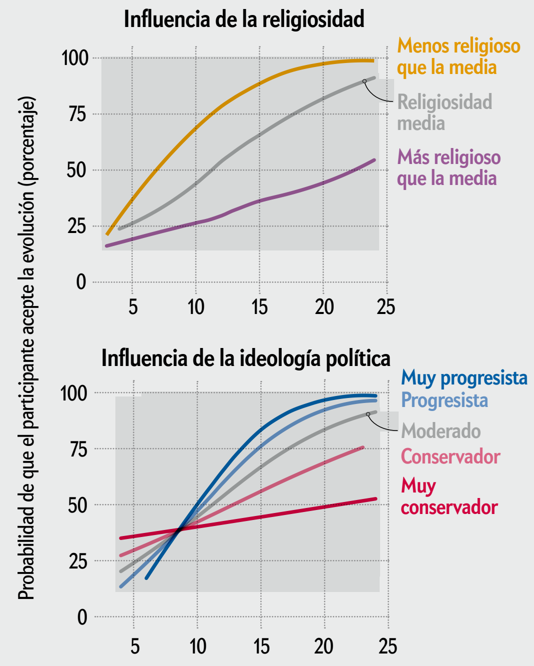
Una mayor comprensión de la teoría parece influir más en su aceptación que la religión o la ideología política

El negacionismo de la ciencia puede parecer en ocasiones incurable; de hecho, los estudios sobre el tema casi nunca resultan alentadores. Entre otros ejemplos, una investigación de la Facultad de Derecho de Yale sugería que, a la hora de formar opiniones acerca de cuestiones polémicas, como el cambio climático o la evolución, nuestros valores políticos o religiosos revisten más importancia que los conocimientos sobre el asunto.

Ahora, un estudio publicado en marzo en la revista *BioScience* parece contradecir dicha conclusión, al menos en lo que se refiere a la evolución. Varios investigadores de la Universidad de Pensilvania y otras instituciones evaluaron los conocimientos de un grupo de participantes sobre la teoría, así como su grado de aceptación de la evolución como un hecho comprobado. Al hacerlo, encontraron una relación significativa entre haber entendido los detalles de la teoría y creer en ella, con independencia de la identificación religiosa o política de los sujetos.

A diferencia de investigaciones anteriores en las que solo participaron estudiantes de secundaria o universitarios, las características demográficas de los 1100 sujetos del estudio se aproximaban más a las de la población general de Estados Unidos. Asimismo, los autores incluyeron preguntas más matizadas, a fin de distinguir entre la comprensión intelectual de la evolución por parte de los participantes y sus sentimientos personales hacia ella. Aunque sigue sin estar claro si la formación científica conduce directamente a una mayor aceptación de la evolución, el estudio de la Universidad de Pensilvania sí apoya esta posibilidad.

—*Amanda Montañez*



Los participantes aportaron información sobre su ideología política y grado de religiosidad. Aunque ambos factores influyeron en su aceptación de la evolución, su nivel de conocimientos científicos también parecía desempeñar un papel relevante. Los datos mostrados aquí no distinguen entre diferentes religiones.

CONDUCTA ANIMAL

La medicina de los orangutanes

Los grandes simios usan extractos de plantas para aliviar las extremidades doloridas

La medicina no es solo una invención humana. Muchos otros animales, desde insectos hasta aves y otras especies de primates, usan plantas y minerales para tratar infecciones y otras dolencias. Ahora, Helen Morrogh-Bernard, investigadora de la Fundación para la Naturaleza de Borneo que ha pasado decenios estudiando los orangutanes de la isla, afirma haber encontrado pruebas de que estos animales usan plantas con fines medicinales de un modo nunca advertido con anterioridad.

Durante más de 20.000 horas de observación, Morrogh-Bernard y sus colaboradores constataron cómo diez orangutanes masticaban ocasionalmente cierta planta que no formaba parte de su dieta hasta obtener una pasta espumosa con la que luego se frotaban la piel. Los simios pasaban hasta 45 minutos seguidos masajeando sus brazos o piernas con el mejunje. Los investigadores creen que el hallazgo constituye el primer ejemplo conocido de un animal no humano usando un analgésico tópico.

Curiosamente, la población local emplea la misma planta (*Dracaena cantleyi*, un arbusto de aspecto corriente con hojas pecioladas) para tratar diversos achaques. Los colaboradores de Morrogh-Bernard, de la Academia Checa de Ciencias, la Universidad Palacký y la Universidad Médica de Viena, estudiaron sus propiedades químicas: agregaron extractos de la planta a células humanas que habían sido cultivadas en una placa de Petri y estimuladas para producir citocinas, una respuesta del sistema inmunitario que genera inflamación e incomodidad. Según los resultados de su trabajo, publicados el pasado noviembre en *Scientific Reports*, el extracto del arbusto reducía la producción de varios tipos de citocinas.

El hallazgo sugiere que los orangutanes usarían la planta para reducir la inflamación y tratar el dolor, indica Jacobus de Roode, biólogo de la Universidad Emory que no participó en el estudio. Además, este tipo de descubrimientos podrían ayudar a identificar plantas y sustancias útiles para elaborar medicamentos para las personas, señala el experto.

Es casi seguro que, en algunas criaturas, como los insectos, la capacidad de automedicarse es innata: así, las orugas lanudas que están infectadas con moscas parasitarias buscan y comen sustancias vegetales que resultan tóxicas para dichas moscas. Sin embargo, los animales más complejos pueden aprender esos trucos después de que un miembro de su grupo los descubra. En este caso, un orangután podría haber frotado la planta contra su piel para intentar tratar los parásitos y haberse dado cuenta de que también tenía un agradable efecto analgésico, sostiene Michael Huffman, primatólogo de la Universidad de Kioto que no participó en la investigación. Después, ese comportamiento podría haberse transmitido a otros orangutanes. Debido a que este tipo de automedicación solo se observa en el centro y el sur de Borneo, señala Morrogh-Bernard, es probable que el aprendizaje haya sido local.

—*Doug Main*

AMANDA MONTAÑEZ (*gráfico*); FUENTE: «NO MISSING LINK: KNOWLEDGE PREDICTS ACCEPTANCE OF EVOLUTION IN THE UNITED STATES», POR DEENA SKOLNICK WEISBERG ET AL. EN *BIOSCIENCE*, VOL. 68, N.º 3, 1 DE MARZO DE 2018.



EL MURCIÉLAGO GUANERO de México está adelantando su migración hacia el norte, posiblemente a causa del calentamiento global.

CAMBIO CLIMÁTICO

Calentamiento global y desajustes migratorios

El adelanto de las migraciones de los murciélagos podría ocasionar enormes pérdidas agrícolas

Cada año una enorme bandada de murciélagos migra desde México hasta la gruta Bracken Cave, cercana a San Antonio, en Texas, donde sus integrantes pasan el verano devorando miríadas de insectos que de otro modo asolarían las cosechas. Pero ahora, los quirópteros han comenzado a aparecer mucho antes de lo que solían hacer veinte años atrás, posiblemente a consecuencia del calentamiento del planeta, señala una nueva investigación.

Esa tendencia crea una situación peligrosa puesto que corren el riesgo de no hallar alimento en cantidad suficiente para ellos y sus crías, pues los insectos que capturan tal vez no hayan llegado al lugar, o ni siquiera hayan nacido. Si la colonia de murciélagos ve reducidos sus efectivos como resultado de este desajuste, el control que ejercen sobre los insectos perjudiciales podría quedar desincronizado con respecto a las épocas de crecimiento de los cultivos, lo que podría derivar en pérdidas agrícolas ingentes, advierten los científicos.

«Si todo el sistema se torna inestable, la agricultura de la región se enfrentará a un problema realmente grave», afirma Jennifer Krauel, bióloga especialista en quirópteros de la Universidad de Tennessee en Knoxville, que no ha participado en este novedoso estudio. «No creo que los murciélagos desaparezcan por completo, pero la reducción de la colonia dejará su huella.»

El murciélago guanero (*Tadarida brasiliensis*), la especie migradora que se aloja en Bracken Cave, devora 20 especies de polilla y más de 40 insectos de otro tipo, considerados también dañinos para la agricultura. Una de sus presas favoritas es la polilla del gusano de la mazorca del maíz (*Helicoverpa zea*), que se nutre de las plantas de maíz, soja, patata y calabaza, y causa daños en las cosechas que suponen un coste anual de millones de dólares para los agricultores de EE.UU. Un estudio de 2011 cifró la contribución indirecta de los murciélagos a la economía estadounidense en 23.000 millones de dólares por su labor de control de los fitófagos y la caza de otros animales que depredan a los insectos polinizadores.

En el nuevo estudio, científicos de Rothamsted Research, un laboratorio agrícola en el sur de Inglaterra, tomaron los datos de radar procedentes de cerca de 160 estaciones meteorológicas de EE.UU. para analizar la actividad de la colonia de murciélagos de Texas (la mayor del mundo, con una población máxima que ronda los 40 millones de individuos) desde 1995 hasta 2017. En las imágenes del radar se aprecian las gigantescas nubes de murciélagos cuando estos emergen de la cueva al anochecer para comer. Su intención inicial era demostrar que el radar puede ser una herramienta válida para calcular con precisión las dimensiones de las colonias. Pero en el curso de su investigación, publicada en línea el pasado febrero en *Global Change Biology*, descubrieron que es-

BOTÁNICA

Plantas en guardia

La mera presencia de un animal desencadena mecanismos de defensa de amplio espectro

Las plantas no pueden huir ni buscar refugio, por lo que recurren a otras estrategias para no ser devoradas. Algunas enroscan sus hojas, otras segregan sustancias de sabor desagradable si perciben animales que babean o depositan sus huevos sobre ellas, o las comienzan a masticar, todas señales inequívocas de que serán víctimas inminentes. Nuevas investigaciones revelan ahora que algunas son capaces de detectar un herbívoro mucho antes de que este se lance sobre ellas, lo que concede tiempo a la planta para desplegar una defensa preventiva que incluso funciona contra otras plagas dañinas.

Cuando el ecólogo John Orrock, de la Universidad de Wisconsin-Madison, esparció baba de caracol por el suelo (el moco deslizante que el molusco segrega para desplazarse), las tomateras cercanas parecieron percatarse. Aumentaron la concentración de una enzima llamada lipooxigenasa, un conocido elemento disuasivo contra los herbívoros. «Ninguna acabó siendo atacada», explica Orrock. «Les dimos pistas que advertían de la inminencia del ataque, lo que bastó



JOEL SARTORE, GETTY IMAGES (*murciélagos*); THOMAS FUCHS (*plantas*)

taban abandonando sus terrenos de invernada en México antes, y también estaban procreando antes.

«Nos causó una gran sorpresa», afirma el meteorólogo de Rothamsted Phillip Stepanian, uno de los autores del estudio. El comportamiento de los murciélagos parece coincidir con un cambio en las temperaturas estacionales. «No estábamos allí para observar el cambio climático, pero de repente se hizo muy obvio.»

Stepanian y sus colaboradores también comenzaron a observar que un creciente número de murciélagos permanece ahora durante el invierno en Bracken Cave, en lugar de retornar a México para pasar la estación allí, un comportamiento no descrito durante el primer registro de estas poblaciones, que se remonta a 1957. La invernada es otro signo de que las temperaturas más cálidas están alterando su ritmo anual, asegura Stepanian.

Otro estudio independiente acometido con los murciélagos migratorios de Indiana, publicado el año pasado, comprobó que las variaciones de la temperatura afectaban al momento de llegada y de partida, un indicio similar de la posible influencia del cambio climático. Joy O'Keefe, profesora de biología de la Universidad Estatal de Indiana y una de las autoras de dicho estudio, afirma que el adelanto de la llegada a sus dormideros estivales podría exponer a esos murciélagos a olas de frío en las que podrían morir congelados.

La pronta migración de los murciélagos también podría quedar desajustada con respecto al régimen de lluvias habitual. Muchos insectos que estos devoran se multiplican en lagunas y estanques estacionales. Si llegan demasiado pronto para beneficiarse de las lluvias del verano y de la abundancia de insectos resultante, podrían tener problemas para alimentar a sus crías o simplemente dejarían de criar, explica O'Keefe. Teme que este cambio suponga el principio del declive de los murciélagos del Medio Oeste norteamericano, lo que sin duda sería una mala noticia para la especie humana.

«El descenso de sus poblaciones podría tener graves consecuencias para la agricultura», y añade que estos mamíferos alados controlan, además, importantes vectores de enfermedades, como los mosquitos.

Winifred Frick, director científico de la ONG Bat Conservation International, destaca otros hallazgos procedentes de Australia, donde el agravamiento de las sequías y el consiguiente descenso de las poblaciones de insectos han causado grandes mortandades entre los murciélagos frugívoros. Episodios como esos podrían comenzar a ser más probables en EE.UU., explica Frick.

Los investigadores de Rothamsted no están seguros de que el cambio climático sea el único responsable de que la colonia de Bracken Cave esté adelantando la migración. Si bien se ha hallado un nexo directo entre las temperaturas estacionales y la migración en el caso de las aves, los quirópteros también se ven influidos por factores como los cambios en la velocidad y la dirección de los vientos. Y no acaban ahí las complicaciones. «Los murciélagos son pequeños animales de hábitos nocturnos, por lo que su observación y seguimiento resulta difícil», aclara Stepanian. «Tenemos una idea de lo que podría estar sucediendo, pero vincularlo realmente con la causa es el paso siguiente.» —*Inga Vesper*

---

para desencadenar notables cambios bioquímicos en ellas.»

Al principio Orrock comprobó que esta defensa actuaba contra los caracoles; en el último estudio, su equipo midió el impacto de esa alerta babosa sobre otra amenaza. Descubrieron que ciertas orugas, que normalmente engullen con glotonería las hojas de la tomatera, no mostraban ninguna apetencia por ellas si las plantas habían sido expuestas a la baba de caracol y habían desplegado su resistencia bioquímica. Esta defensa inespecífica podría ser una estrategia que permitiría a los vegetales sacar más provecho al mejorar sus posibilidades globales de supervivencia, opina Orrock, que ha dado a conocer los resultados con sus colaboradores este pasado marzo en *Oecologia*.

El descubrimiento de que la aproximación de un caracol puede desencadenar una respuesta en la planta que afecta a otro animal intriga a Richard Karban, experto en comunicación vegetal de la Universidad de California en Davis, ajeno al estudio. «Resulta notable que las plantas respondan antes de ser dañadas y que esas señales tengan efectos de tanto calado», comenta Karban. La investigación fue meticulosa, añade, pero se pregunta cómo detectaron las tomateras esas sustancias de la baba de caracol si nunca llegaron a entrar en contacto con ellas.

«Esa es la pregunta del millón», concluye Orrock. Espera que las futuras investigaciones desentrañen los mecanismos que permiten percibir esas pistas a una distancia relativa.

—*Erica Tennenhouse*





UN MOSQUITO DE LOS HONGOS en ámbar (*1*) e insectos prehistóricos en ámbar báltico de Lituania (*2*).

PALEONTOLOGÍA

Los insectos ausentes del registro fósil

Un intrigante vacío en la historia evolutiva de los hexápodos parece esconder los secretos sobre su origen

Los insectos abundan en todas partes: en el aire, sobre el suelo, bajo él y, en ocasiones, en nuestras casas y alimentos. Sin embargo, no hay ninguno en el registro fósil de hace entre 385 y 325 millones de años. El primer fósil de insecto conocido corresponde a una criatura sin alas de hace 385 millones de años parecida a una lepisma, o «pececillo de plata». Sin embargo, durante los siguientes 60 millones de años no hay ni una sola libélula, saltamontes o cucaracha.

Este vacío, también conocido como «brecha de los hexápodos», lleva largo tiempo incomodando a los paleontólogos, dado que hoy en día los insectos se encuentran en casi cualquier hábitat terrestre que podamos imaginar. Una hipótesis sugiere que unos niveles de oxígeno asfixiantemente bajos evitaron que la diversidad de insectos se disparase durante ese período, y que tales criaturas solo proliferaron una vez que aumentó la concentración de este gas esencial para la vida.

Sin embargo, algunos avances recientes en el estudio de los niveles de oxígeno de la atmósfera de la Tierra primitiva han puesto en entredicho esa idea, explica Sandra Schachat, paleoentomóloga de Stanford que hace poco dirigió un estudio que modelizaba la disponibilidad de este gas durante la brecha de los hexápodos. Según la investigación, publicada en enero en *Proceedings of the Royal Society B*, el nivel de oxígeno atmosférico en dicho período habría sido mucho más elevado de lo que se pensaba hasta ahora.

El desacuerdo entre los hallazgos de Schachat y las investigaciones anteriores se debe a que su equipo utilizó datos atmosféricos más recientes, los cuales pueden obtenerse ahora de manera más económica y eficiente que antes. «Si se confirman estos resultados, podríamos descartar los niveles bajos de oxígeno como una posibilidad [para explicar la brecha]», apunta Jesús Lozano Fernández, paleobiólogo de la Universidad de Bristol que no participó en el estudio.

Schachat y su equipo escudriñaron la información sobre fósiles contenida en una base de datos paleontológicos pública. Al hacerlo, se percataron de que había algo especial en buena parte de los fósiles de insectos aparecidos tras la brecha: tenían alas. Esa fue probablemente la característica que impulsó la diversidad de los hexápodos, ya que los insectos alados pueden escapar con rapidez de los depredadores y obtener alimentos de otro modo inalcanzables, como hojas y otros insectos. «La brecha no es más que el final de un intervalo de tiempo más largo durante el cual los insectos eran muy poco comunes porque las alas no se habían originado aún», afirma Schachat.

> «Los insectos eran muy poco comunes porque las alas no se habían originado aún»
> —SANDRA SCHACHAT, *STANFORD*

La pregunta que ocupa ahora a Schachat es cómo evolucionaron las alas, ya que, según parece, los primeros insectos voladores descubiertos tras la brecha eran ya muy diversos. «Los dos primeros insectos alados que hay en el registro fósil no pueden ser más diferentes entre sí», señala la investigadora. Así pues, los orígenes de las alas deben encontrarse dentro de la propia brecha. Escondidos en algún lugar, podría haber fósiles de este período que revelen la manera en que los insectos se convirtieron en los primeros animales en conquistar los cielos.

—*Lucas Joel*

ALAMY/MUSEO DE HISTORIA NATURAL DE LONDRES (*mosquitos de los hongos*); ALAMY/PJR STUDIO (*insectos en ámbar de Lituania*)

Saurios (lagartos)

Riqueza de especies: 0 · 1 · 49 · 98

Ofidios (serpientes)

Riqueza de especies: 0 · 1 · 63 · 126

Quelonios (tortugas)

Riqueza de especies: 0 · 1 · 12 · 24

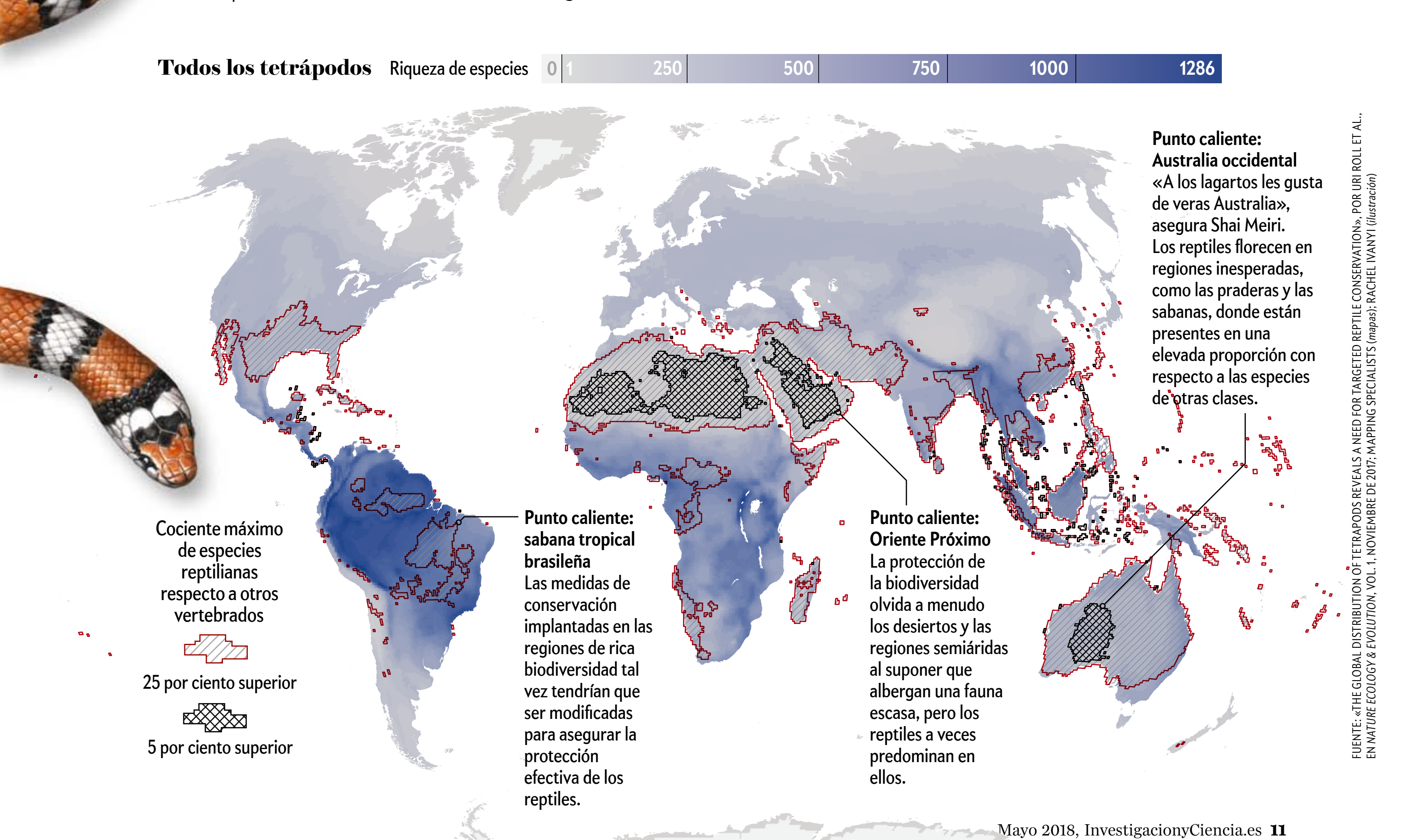
BIOGEOGRAFÍA

¿Dónde viven los reptiles?

Lagartos, serpientes y tortugas se concentran en regiones del planeta que en su mayoría no gozan de protección

La diversidad de aves y mamíferos varía de un lugar a otro, pero ambas clases de vertebrados han colonizado casi toda la superficie del globo. No sucede así con los reptiles. Nuevas investigaciones indican que están concentrados en ciertas regiones y casi no aparecen en el resto del planeta (*mapa azul*). Esa distribución tan desigual (*mapas en marrón*) resulta sorprendente. Los especialistas han representado gráficamente las distribuciones más o menos uniformes de otros tetrápodos (los vertebrados descendientes de los primeros seres vivos dotados de cuatro extremidades). Tales poblaciones suelen ser abundantes en regiones extensas y se reducen gradualmente al alejarse de ellas en múltiples direcciones. Los expertos supusieron que los reptiles seguirían un patrón similar y diseñaron las medidas de conservación basándose en esa falsa premisa. Ahora que los investigadores saben realmente dónde habitan las 10.000 especies de reptiles del mundo, Shai Meiri, de la Universidad de Tel Aviv y miembro del equipo del estudio, asegura que «podremos concretar mejor las amenazas que se ciernen sobre ellas y sabremos dónde actuar primero para proteger mejor todo el medio natural».

—*Mark Fischetti*



FUENTE: «THE GLOBAL DISTRIBUTION OF TETRAPODS REVEALS A NEED FOR TARGETED REPTILE CONSERVATION», POR URI ROLL ET AL., EN *NATURE ECOLOGY & EVOLUTION*, VOL. 1, NOVIEMBRE DE 2017; MAPPING SPECIALISTS (*mapas*); RACHEL IVANYI (*ilustración*)

AGENDA

CONFERENCIAS

11 de mayo
Conferencia sobre Richard Feynman
David Kaiser, MIT
Edificio Histórico de la Universidad de Barcelona
Barcelona
universitatsirecerca.gencat.cat

EXPOSICIONES

Hasta el 13 de mayo
Con A de astrónomas
Casa de las Ciencias
Logroño
11defebrero.org

Hasta el 27 de mayo
Ciencia e imprenta
Instituto Cervantes
Madrid
www.cervantes.es

OTROS

Del 3 al 5 de mayo — Jornadas
16.ª Feria de la Ciencia
Palacio de Exposiciones y Congresos
Sevilla
www.feriadelaciencia.org

Del 14 al 16 de mayo — Festival
Pint of Science
Charlas científicas en bares
58 ciudades españolas
pintofscience.es

Hasta el 17 de mayo — Concurso
Inspiraciencia
Relatos cortos de inspiración científica
Accésit Feynman 2018
Organiza: CSIC
www.inspiraciencia.es

19 de mayo — Espectáculo
Fantàstic Físic Feynman
CosmoCaixa
Barcelona
www.cosmocaixa.com



Hasta el 31 de mayo — Concurso
Matemáticas en tierra de cine
Fotografía matemática
Organiza: Sociedad Andaluza de Educación Matemática Thales
Almería
thales.cica.es

SOSTENIBILIDAD

Contrabando de madera

Denunciado el tráfico ilegal de palisandro en Tailandia

La caza furtiva de elefantes, rinocerontes y pangolines acapara titulares casi a diario. Pero ¿y el comercio ilegal de madera? No mucho. Pese a ello, la tala ilegal constituye un negocio de primer orden; la Organización de las Naciones Unidas cifra su valor en decenas de miles de millones de dólares.

Los palisandros, categoría que abarca a 33 especies comerciales de maderas nobles que tienen en común un aroma floral y dulce, son víctimas especialmente lucrativas. Estos árboles están siendo talados de manera ilegal a un ritmo vertiginoso: solo las autoridades tailandesas confiscan en promedio cada día más de un cargamento de esta madera, según una investigación publicada en línea en marzo en *Environmental Conservation*.

«Ignoraba por completo las dimensiones de este tráfico ilegal en Tailandia», afirma uno de los autores del estudio, Vincent Nijman, antropólogo de la Universidad Oxford Brookes. «Más de una docena de especies de palisandro corren grave riesgo de desaparecer en las décadas venideras.»

Esta madera es apreciada desde hace siglos en la fabricación de instrumentos musicales y mobiliario, pero el aumento del poder adquisitivo en China ha disparado la demanda. Muchas de las especies afectadas —originarias de Sudamérica, África y el sudeste de Asia— gozan de protección legal, pero tales medidas no han frenado el auge del comercio ilegal de su madera. La práctica ilícita no solo acaba con los árboles centenarios, sino que arrasa los tramos de selva que se desbrozan para llegar a ellos.

El control del comercio internacional se antoja difícil: no existen bases de datos fiables, y las noticias publicadas y los informes oficiales suelen estar redactados en las lenguas locales. Esto último resulta especialmente acuciante en el sudeste de Asia, puesto que fuera de esa región no son muchas las personas que dominan lenguas como el tailandés, camboyano, vietnamita o indonesio. «Esto ha permitido que hasta ahora algunos países hayan permanecido lejos de la mirada de la comunidad conservacionista internacional», denuncia Nijman.

Penthai Siriwat, doctoranda de Nijman, rastreó los noticiarios tailandeses en busca de incautaciones de palisandro, y descubrió la friolera de 835 casos desde enero de 2014 hasta abril de 2016. Siriwat y Nijman hallaron que el predictor más fiable de las confiscaciones no es el número de árboles presentes en una zona, sino la cercanía de una frontera internacional o de un puerto.

Sus pesquisas indican que la mayor parte del palisandro tailandés tiene como destino China. Quizá más importante, también señalan los lugares donde las autoridades podrían combatir con más eficacia el contrabando. El seguimiento de las incautaciones en una base de datos actualizable en el acto aportaría una información aún más valiosa, explica Nijman.

Pero, aunque esos datos estuviesen disponibles, Siriwat matiza que la magnitud del tráfico ilegal de palisandro desborda los recursos asignados para ponerle freno. «Combatir a bandas de más de 40 leñadores ilegales con patrullas de cinco agentes forestales es una misión complicada, por no decir peligrosa», me explica. «En tailandés *palisandro* se pronuncia *mai phayung*, que se asemeja a la palabra *sostener*. Irónicamente, el apoyo que este árbol ha recibido es hoy por hoy nulo.»

—Rachel Nuwer



FUENTE: «USING ONLINE MEDIA-SOURCED SEIZURE DATA TO ASSESS THE ILLEGAL WILDLIFE TRADE IN SIAMESE ROSEWOOD», POR PENTHAI SIRIWAT Y VINCENT NIJMAN EN *ENVIRONMENTAL CONSERVATION*, 2018; MAPPING SPECIALISTS (*mapa*); COSMOCAIXA BARCELONA (*cartel Feynman*)

PALEONTOLOGÍA

La diversidad de ceratópsidos en México

Los hallazgos fósiles de los últimos años contribuyen a explicar la diversificación que experimentaron estos dinosaurios en la región

HÉCTOR E. RIVERA-SYLVA E IVÁN E. SÁNCHEZ URIBE



RECONSTRUCCIÓN de *Yehuecaucheratops mudei*.

MUSEO DEL DESIERTO

Los ceratópsidos son una de las familias de dinosaurios más diversas del Cretácico tardío o superior (período comprendido hace entre 65 y 100 millones de años). Se caracterizan por presentar de uno a nueve cuernos o espinas en diversas zonas del cráneo y rostro. Sus fósiles han sido descubiertos en varios puntos de Asia y Norteamérica. En este último continente, los hallazgos se distribuyen desde Alberta, Canadá y Estados Unidos hasta los estados mexicanos de Coahuila, Sonora y Chihuahua, lugares donde se han encontrado los registros más meridionales del grupo hasta el momento.

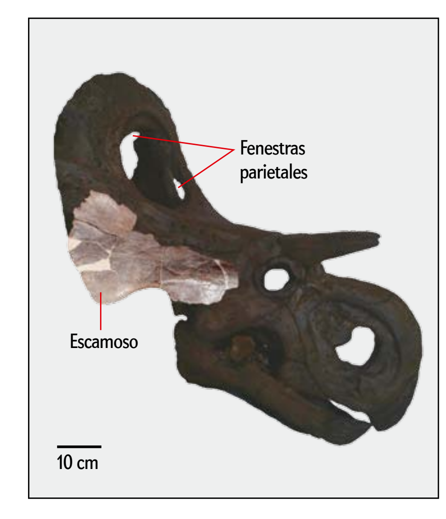
En el último decenio, nuestro equipo del Museo del Desierto, junto con otros investigadores de otros centros, hemos descubierto una serie de fósiles de ceratópsidos en la provincia de Coahuila que nos han llevado a describir nuevas especies de este grupo. A partir de estos y otros datos hemos deducido los paleoambientes que ocuparon estos dinosaurios en México y cómo se diversificaron las especies descritas. Nuestro trabajo se ha apoyado en descubrimientos de fósiles de ceratópsidos realizados en el siglo pasado en la región.

Hallazgos históricos

El primer descubrimiento de fósiles de un ceratópsido en México fue realizado en 1958 en la cuenca de Parras, en Coahuila, por un equipo de la Universidad de Texas. El espécimen fue identificado años después por el geólogo y divulgador John Wilson como un ceratópsido, y fue atribuido al género *Monoclonius* por Edwin Colbert, del Museo Americano de Historia Natural.

Más tarde, el paleontólogo mexicano Silva Bárcenas informó de que José Delgado, geólogo del Fomento Minero de México, había descubierto un ceratópsido cerca de las minas de carbón del Ejido La Cuchilla, en Palaú, Coahuila. Desafortunadamente, el esqueleto se encontraba en mal estado de conservación. Los restos que se lograron rescatar fueron revisados por Wann Langston Jr., de la Universidad

BAJA CALIFORNIA
SONORA
CHIHUAHUA
COAHUILA
Ceratópsido (especie indeterminada)
Agujaceratops mavericus
Coauhilaceratops magnacuerna
Yehuecauhceratops mudei



EN EL NORTE DE MÉXICO se han descubierto numerosos fósiles de ceratópsidos que han permitido, hasta el momento, identificar tres especies, todas en el estado de Coahuila (*izquierda*). Las características del cráneo, como la forma del hueso escamoso o las fenestras parietales, distinguen a menudo una especie de otra; aquí se muestra el cráneo de *Yehuecaucheratops mudei* (*arriba*).

de Texas en Austin, quien los asignó al género *Chasmosaurus*.

En los años posteriores, aparecieron algunos informes sobre el hallazgo de restos fósiles del grupo en los estados de Baja California, Coahuila y Sonora, pero la información era dispersa y no aportaba ninguna otra especificación. No fue hasta la entrada del nuevo siglo cuando esta carencia de datos se enmendó.

Descubrimientos recientes

En 2004, un equipo formado por investigadores del Museo del Desierto y de la Universidad de Utah refirió el hallazgo de fósiles de individuos de las subfamilias Chasmosaurinae y Centrosaurinae. Recuperaron los restos en tres localidades cercanas a Saltillo, al sur de Coahuila, en estratos datados de hace 72 millones de años.

A partir del conjunto de fósiles correspondiente a la subfamilia Chasmosaurinae, en 2010 el mismo equipo describió la especie *Coahuilaceratops magnacuerna*. Estimaron que sus cuernos supraorbitales alcanzaban 1 metro de longitud, los más grandes conocidos hasta ahora en un ceratópsido. El cráneo tenía una longitud de unos 1,8 metros, y se hallaba dotado de fenestras (aberturas) parietales largas y un hueso escamoso muy agrandado. Dedujeron que el cuerpo medía unos 6,7 metros de longitud y pesaba entre unas 4 y 5 toneladas.

Posteriormente, entre 2007 y 2011, otra comisión del museo, en la que participamos los autores, documentó restos de ceratópsidos en un sustrato rocoso correspondiente a la formación Aguja, en el municipio de Ocampo, en el norte de Coahuila. El material, que comprendía huesos del cráneo con alto carácter diagnóstico, nos permitió describir en 2017 un segundo ceratópsido: *Yehuecauhceratops mudei*. El ejemplar cuenta con un escamoso con cresta redondeada oblicua corta, que discurre de modo paralelo al borde ventral del hueso, con una protuberancia prominente; probablemente representa el núcleo de un cuerno corto o una escama ampliada lisa y confluente con la cresta, un rasgo que no ha aparecido hasta el momento en otras especies de centrosaurinos norteamericanos. El espécimen correspondería a un adulto, según indica el cierre de la línea de sutura neurocentral, aunque no se dispone de más datos para determinar su sexo.

Un tercer ceratópsido lo constituye *Agujaceratops mavericus*, cuyos restos fósiles encontramos en 2016 también en el municipio de Ocampo, en la formación Aguja, con una edad estimada en unos 72 millones de años. El espécimen coincide con la parte respectiva del holotipo descubierto en el Parque Nacional Big Bend, en Texas, adyacente a la frontera mexicana. En ambos fósiles, la base del escamoso es proporcionalmente más corta y ancha que en otras especies de chasmosaurinos. Esta característica es considerada, pues, un rasgo diagnóstico de la especie.

Con una longitud corporal de unos tres metros, *Y. mudei* era un ceratópsido pequeño y grácil, en comparación con el corpulento *C. magnacuerna*, mientras que *A. mavericus* presentaba un tamaño intermedio entre ambos.

Divergencia de las especies

Hace 74 millones de años, en el período Campaniano (final del Cretácico tardío), el planeta experimentó un notable enfriamiento que conllevó la disminución del nivel del mar. Ello afectó a los paleoambientes y las comunidades ecológicas del continente norteamericano, y más en concreto, a las comunidades vegetales, lo que debió de influir en la diversificación de los ceratópsidos (se alimentaban de plantas).

Sabemos que las tres especies de ceratópsidos de Coahuila descritas, de características morfológicas distintas, fueron contemporáneas. El registro paleobotánico sugiere que la flora bien pudo ser un factor que contribuyó a esta divergencia.

IVÁN E. SÁNCHEZ URIBE

Proponemos que dentro de Coahuila debió de existir una barrera ecológica que separaba dos zonas: una más septentrional, donde se hallaron los restos de *Y. mudei* y *A. mavericus*, y otra meridional, donde se descubrió *C. mangacuerna*.

Mientras que especies de tamaño pequeño y medio, como *Y. mudei* y *A. mavericus*, respectivamente, convivían en ecosistemas equivalentes a manglares, *C. mangacuerna*, de mayores dimensiones, pudo disponer de un ecosistema de tipo selvático en donde las fuentes de alimento suelen ser más variadas y con mayor diversidad de nichos ecológicos.

Esta propuesta bien puede verse reforzada con cada nuevo descubrimiento que se haga en el futuro, y aunque el material disponible en el norte de México es actualmente raro y en su mayoría fragmentario, no se descartan nuevas y relevantes investigaciones que enriquezcan el conocimiento sobre la radiación evolutiva de los ceratópsidos y de otros saurios del Campaniano tardío.

Héctor E. Rivera-Sylva
dirige el Departamento de Paleontología del Museo del Desierto, en México.

Iván E. Sánchez Uribe
es investigador de dicho museo.

PARA SABER MÁS

New specimens of horned dinosaurs from the Aguja formation of west Texas, and a revision of agujaceratops. Thomas M. Lehman, Steven L. Wick y Kenneth R. Barnes en *Journal of Systematic Palaeontology*, vol. 15, n.º 8, págs. 641-674, 2016.

A centrosaurine (dinosauria: Ceratopsia) from the Aguja Formation (late campanian) of northern Coahuila, Mexico. Héctor E. Rivera-Sylva, Brandon P. Hedrick y Peter Dodson en *PLoS One*, vol. 11, n.º 4, e0150529, 2016.

Mexican ceratopsids: Considerations on their diversity and biogeography. Héctor E. Rivera-Sylva et al. en *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 75, págs. 66-73, 2017.

FÍSICA

El turbulento viaje de la energía

Un trabajo demuestra una hipótesis centenaria sobre la transferencia de energía en un flujo turbulento. El resultado augura mejoras sustanciales en los modelos empleados para describir la dinámica de los fluidos

JOSÉ I. CARDESA, ALBERTO VELA-MARTÍN Y JAVIER JIMÉNEZ

El estudio de la turbulencia ha sido considerado históricamente uno de los problemas más difíciles de la física. Este fenómeno se desencadena cuando un fluido, como el aire o el agua, comienza a comportarse de manera caótica, lo que da lugar a la formación de torbellinos y otras estructuras irregulares que evolucionan de manera errática. Podemos observarlo con facilidad en el ascenso de una columna de humo o en el curso de un río agitado, y afecta de manera persistente a aviones, automóviles, barcos y otros vehículos. No obstante, el análisis teórico de la turbulencia se ve impedido por la extraordinaria complejidad matemática que entrañan las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los fluidos, conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes.

Los flujos turbulentos se caracterizan por la aparición de remolinos de tamaño muy distinto que interactúan entre sí. Esta disparidad de tamaños, o escalas, dificulta enormemente su modelización. Para intentar simplificarla, hace casi cien años se postuló un modelo conocido como «de cascada»; según este, los remolinos grandes transmiten su energía a otros de tamaño parecido pero algo más pequeños, en un proceso que se repite hasta alcanzar unas dimensiones lo suficientemente reducidas para que la viscosidad, el «rozamiento interno» del fluido, los disipe.

Este viaje de la energía hacia su disipación reviste gran importancia tanto teórica como práctica: se estima que cerca de un 5 por ciento del gasto energético de la humanidad va a parar a la disipación de flujos turbulentos. Sin embargo, aunque la hipótesis de la cascada se ha usado en numerosos modelos cuyas predicciones se ajustan relativamente bien a los resultados experimentales, también ha convivido con teorías que postulan que la energía se transfiere directamente entre remolinos de escalas muy distintas.

La resolución de esta controversia, al menos en términos estadísticos, no ha sido posible hasta hace poco. En un trabajo publicado en *Science*, los autores de este artículo referimos la primera observación directa del fenómeno de cascada. Nuestra aportación no solo confirma la transferencia de energía entre remolinos de tamaños similares, sino que cuantifica lo que debe entenderse por semejanza o disparidad de escalas, lo que permitirá refinar los modelos usados actualmente para tratar la turbulencia.

Un problema de datos

Al analizar un fluido en el que la velocidad es distinta en cada punto y varía con el tiempo, el análisis de la turbulencia plantea numerosos retos. El principal radica en que las técnicas experimentales tienen dificultades para medir de manera simultánea la velocidad en más de unos pocos puntos. Esta carencia se ha paliado en los últimos años con el desarrollo de la simulación numérica directa, una técnica que consiste en aproximar la solución de las ecuaciones que rigen la evolución del flujo mediante el cálculo iterativo en superordenadores. La necesidad de usar grandes máquinas de cómputo se debe a que un flujo realmente turbulento implica considerar remolinos de tamaño muy dispar, y a que la relación entre el tamaño de los remolinos más grandes y los más pequeños determina tanto el grado de turbulencia como el coste del cálculo. Como consecuencia, cuanto más turbulento es el flujo, más capacidad de cómputo se requiere.

En este contexto, el avance que han experimentado los procesadores durante



LOS FÍSICOS LLEVAN MÁS DE UN SIGLO intentando entender la turbulencia, el proceso por el que la dinámica de un fluido se torna caótica. Por primera vez, un trabajo ha demostrado que, en el régimen turbulento, la energía del fluido se transmite de manera escalonada desde los remolinos de mayor tamaño hacia aquellos de escala menor.

los últimos años ha permitido simular flujos cada vez más representativos de una turbulencia plenamente desarrollada. De hecho, hoy la dificultad no radica tanto en la potencia de cálculo como en la capacidad para almacenar y analizar los datos. Al ser la cascada un fenómeno dinámico, su simulación ha de ser sostenida en el tiempo y guardada en forma de «fotogramas», como si se tratase de una película. Esto solo ha sido posible hace poco gracias a las técnicas de macrodatos (*big data*) y el consecuente abaratamiento en la capacidad para almacenar grandes cantidades de información.

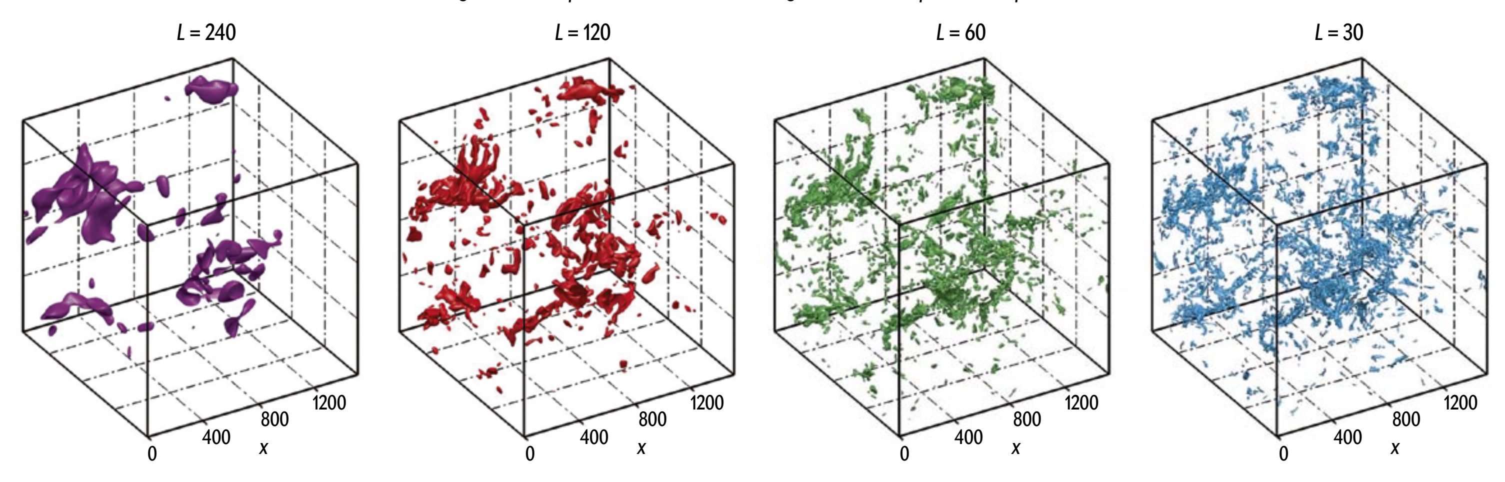
Nuevos datos, nuevas herramientas

La gran mayoría de los trabajos anteriores sobre la cascada turbulenta y la interacción entre escalas no usaban los remolinos u otro tipo de estructuras como objeto directo de análisis. En su lugar, sustituían el tratamiento basado en tamaños y tiempos por otro que emplea como variables básicas la longitud de onda y la frecuencia de las distintas perturbaciones. Dicha técnica se conoce como «análisis de Fourier», y es ampliamente usada en matemáticas. Un ejemplo sencillo nos lo proporciona una nota musical, la cual puede describirse como una perturbación de densidad que varía de forma sinusoidal en el espacio y en el tiempo, o bien como una señal con una frecuencia y longitud de onda características.

Esa forma de analizar la turbulencia puede considerarse un legado de las técnicas experimentales de los años treinta del siglo xx, que solo proporcionaban medidas de las oscilaciones de la velocidad en un punto. Por ello, y dado que siempre hay que comparar las predicciones de un modelo con los datos empíricos, las teorías elaboradas a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes se decantaron hacia un enfoque del problema en términos de frecuencias y longitudes de onda, dejando de lado la descripción de los remolinos en el espacio y en el tiempo. Sin embargo, sorprende que la llegada de la simulación numérica directa, la cual sí permite un análisis espaciotemporal, no trajese consigo la desaparición de unas herramientas que oscurecían el estudio de un fenómeno anclado al espacio real.

A partir de las técnicas desarrolladas por el grupo de uno de nosotros (Jiménez) para seguir las estructuras de flujo en el espacio y en el tiempo, nuestro análisis de la cascada turbulenta se basó en estudiar las regiones más energéticas de un fluido a cuatro escalas diferentes, cada una de ellas separada de la siguiente por un factor de dos. Ello nos permitió obtener cuatro «películas», cada una de las cuales mos-

L = escala de análisis; *x* = distancia *(ambas magnitudes se expresan en unidades de la longitud viscosa, un parámetro típico de cada fluido)*



UN FLUIDO, CUATRO ESCALAS: Un nuevo tipo de análisis ha permitido demostrar que, en un flujo turbulento, los remolinos grandes transmiten su energía a otros de tamaño similar pero algo más pequeños. Estas imágenes indican cómo se distribuyen las zonas más energéticas de un fluido (aquellas cuya energía supera cierto umbral) en cuatro escalas distintas: aunque representan el mismo fluido en el mismo instante de tiempo, difieren en su «grado de resolución», o escala característica de análisis (*L*). Puede observarse que los objetos que aparecen a escalas separadas por un factor de dos tienden a situarse en regiones del espacio próximas entre sí; sin embargo, esa tendencia desaparece al considerar escalas separadas por un factor de cuatro o más. Ello demuestra que la energía solo se transfiere directamente entre remolinos de escalas próximas, no entre aquellos con tamaños muy distintos.

traba la evolución del fluido a un grado característico de resolución espacial.

Nuestro análisis mostró que el tamaño de las regiones de alta energía aumentaba con la escala, según cabía esperar. Sin embargo, al igual que una instantánea no puede sustituir a la película completa, cada película no permite desentrañar por sí sola la dinámica de la cascada, ya que esta implica una relación entre escalas distintas. Fue la combinación de todas las películas la que nos permitió confirmar la hipótesis postulada hace casi un siglo sobre la existencia de una casada de energía.

En primer lugar, nuestros resultados mostraron que los objetos que aparecían a escalas separadas por un factor de dos tendían a situarse en las mismas regiones del espacio. Sin embargo, no ocurría lo mismo al considerar escalas separadas por un factor de cuatro o más. Esto implica que la transferencia de energía entre estructuras es local tanto en posición como en escala; es decir, al igual que un torbellino no «salta» súbitamente de una localización del espacio a otra muy distante, la transferencia de energía solo tiene lugar entre escalas contiguas, no entre escalas muy diferentes entre sí.

Por otra parte, cabe resaltar el sentido que sigue la evolución temporal del proceso. Al inicio de la simulación, los objetos de escala L se sitúan en las mismas posiciones que los de escala $2L$. Sin embargo, al final de sus vidas tienden a colocarse allí donde están los de escala $L/2$. Esta huella estadística, que aparece al promediar la evolución de todas las estructuras, demuestra claramente que la energía procede de forma escalonada a través de todas las escalas y sustenta la hipótesis de una cascada turbulenta incremental.

Mejores modelos

Nuestra investigación emplea la simulación numérica directa como una herramienta que refleja con fidelidad el comportamiento de las ecuaciones. Sin embargo, esto contrasta con la manera en que se procede en los casos de relevancia industrial. Ello se debe a que el abanico de escalas que hemos de considerar para describir el flujo que rodea a un barco o a un avión es aún muy superior al que podemos simular en los superordenadores actuales. Como consecuencia, los ingenieros no resuelven las ecuaciones completas de Navier-Stokes en estos casos, sino versiones simplificadas en las que los remolinos de menor tamaño se sustituyen por modelos que simplifican significativamente los cálculos.

La mejora de dichos modelos ha sido objeto de una intensa investigación durante al menos un siglo. Sin embargo, esta debería basarse en simplificaciones que no solo resulten ventajosas a efectos de cálculo, sino que al mismo tiempo describan bien el flujo real. Para ello, es necesario que estén inspiradas en la física del problema. En este sentido, creemos que los resultados referidos aquí permitirán mejorar los futuros modelos de turbulencia, ya que por primera vez resulta posible cuantificar la localidad de las escalas por las que transcurre este turbulento viaje de la energía.

José I. Cardesa, Alberto Vela-Martín *y* ***Javier Jiménez*** *investigan en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio de la Universidad Politécnica de Madrid.*

PARA SABER MÁS

Time-resolved evolution of coherent structures in turbulent channels: Characterization of eddies and cascades. Adrián Lozano-Durán y Javier Jiménez en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 759, págs. 432-471, noviembre de 2014.

The turbulent cascade in five dimensions. José I. Cardesa, Alberto Vela-Martín y Javier Jiménez en *Science*, vol. 357, págs. 782-784, agosto de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

El enigma de Osborne Reynolds. Álvaro Meseguer y Fernando Mellibovsky en *IyC*, marzo de 2010.

Una vida dedicada a la turbulencia. Eberhard Bodenschatz y Michael Eckert en *IyC*, septiembre de 2014.

CORTESÍA DE LOS AUTORES



Robots autodidactas

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Las máquinas que aprenden del mismo modo que los niños están ayudando a entender cómo se coordinan el cuerpo y la mente para adquirir conocimientos y destrezas

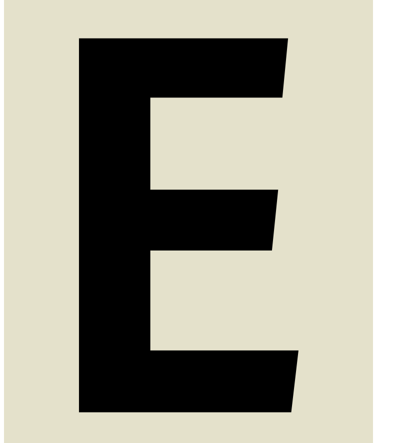
Diana Kwon

Fotografías de Sun Lee



Diana Kwon es periodista especializada en salud y ciencias de la vida. Cuenta con un máster en neurociencia por la Universidad McGill.





En *Chappie*, una película de ciencia ficción de 2015, Deon es un ingeniero que quiere crear una máquina capaz de pensar y de sentir. Para ello escribe un programa de inteligencia artificial (IA) que puede aprender como un niño. La máquina parte de un estado de relativa *tabula rasa* y, solo a partir de la observación y la experimentación con el entorno, adquiere conocimientos generales, el lenguaje y otras habilidades complejas: algo inalcanzable para los sistemas de inteligencia artificial más avanzados de hoy.

Hay máquinas que ya superan las capacidades humanas en ciertas tareas específicas, como contestar las preguntas de un concurso de televisión o jugar al ajedrez y al juego de mesa chino go. En octubre de 2017, la empresa británica DeepMind dio a conocer AlphaGo Zero, la última versión de su sistema de IA para jugar al go. A diferencia de su predecesor, AlphaGo, que había llegado a dominar el juego analizando una inmensa cantidad de partidas jugadas por seres humanos, esta versión acumuló experiencia de forma autónoma, compitiendo contra sí misma. A pesar de tan notable logro, AlphaGo Zero se limita a aprender un juego con reglas claras, y tuvo que jugar millones de veces para obtener su destreza sobrehumana.

Por el contrario, desde la primera infancia en adelante nuestros hijos se desarrollan explorando su entorno y experimentando con el movimiento y el habla. Recopilan datos, se adaptan a nuevas situaciones y transfieren la pericia adquirida en una materia a otras.

Robotistas, neurocientíficos y psicólogos llevan desde los inicios del siglo xxi investigando vías para construir máquinas que imiten ese desarrollo tan espontáneo. Las colaboraciones entre ellos han cuajado en androides capaces de mover objetos, adquirir vocabulario básico y capacidades numéricas, y que incluso exhiben signos de conducta social. Al mismo tiempo, estos sistemas de IA están ayudando a los psicólogos a entender cómo aprenden los niños pequeños.

MÁQUINA DE PREDICCIONES

Nuestro cerebro trata constantemente de predecir el futuro. A tal fin, actualiza sus expectativas para ajustarse a la realidad. Imagínese que se encuentra con el gato de su vecino por primera vez. Como usted tiene un perro y conoce su naturaleza gregaria, infiere que el minino también disfrutará de sus caricias. Sin embargo, cuando alarga el brazo hacia la criatura esta le araña, de modo que usted revisa su teoría sobre los animales de aspecto adorable. Cuando le lleva golosinas, el animal permite que le acaricie. La próxima vez que se encuentre con un felino, le ofrecerá comida antes de tocarlo.

De esta forma, los centros de procesamiento superiores del cerebro refinan continuamente sus modelos internos conforme a las señales recibidas desde los órganos sensoriales. Considere nuestro sistema visual, de una gran complejidad. Las células nerviosas del ojo procesan los rasgos básicos de una imagen antes de transferir esa información a las regiones de nivel superior, que interpretan el significado global de una escena. Curiosamente, las conexiones neuronales también funcionan en sentido contrario: desde los centros de procesamiento de orden superior (como las áreas en las cortezas parietal o temporal) a los inferiores (como la corteza visual primaria y el núcleo geniculado lateral). Algunos neurocientíficos creen que estas conexiones «descendentes» transportan las predicciones del cerebro a los niveles inferiores, y que eso influye en lo que vemos.

Lo crucial es que las señales que descienden desde los niveles superiores del cerebro interactúan continuamente con aquellas que «ascienden» desde los sentidos, lo cual produce un error de predicción: la diferencia entre lo que esperamos y lo que experimentamos. Una señal que transmite esta discrepancia retorna a los niveles superiores, donde ayuda a refinar los modelos internos y a generar nuevas suposiciones, en un bucle que no conoce fin. «La señal del error de predicción impulsa el sistema hacia estimaciones de lo que hay realmente fuera», explica Rajesh P. N. Rao, neurocientífico computacional de la Universidad de Washington.

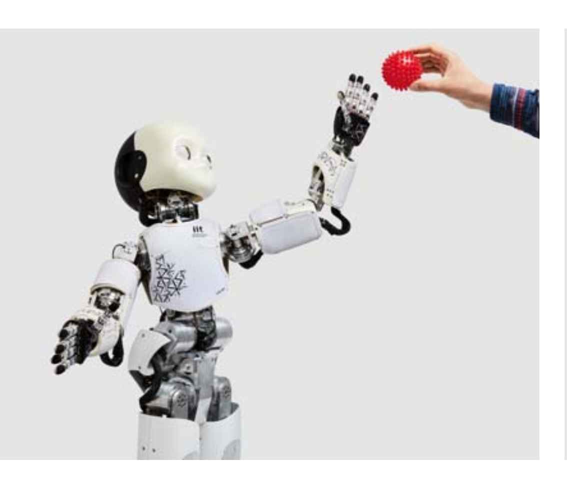
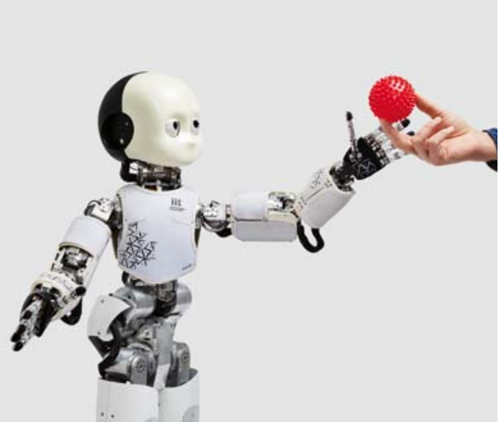
Mientras Rao realizaba el doctorado en la Universidad de Rochester, él y su director de tesis, el neurocientífico computacional Dana H. Ballard, actualmente en la Universidad de Texas en Austin, fueron los primeros en poner a prueba tal codificación

EN SÍNTESIS

Los bebés aprenden de forma autónoma experimentando con su cuerpo y jugando con los objetos de su entorno.

Los robotistas están programando androides con algoritmos que les permiten aprender del mismo modo que lo hacen los niños.

Los estudios con estas máquinas están transformando la robótica y aportando una nueva visión del desarrollo infantil.


ICUB, un androide con el que trabajan los científicos de la Universidad de Plymouth, consigue aprender palabras nuevas, como *pelota*, con más facilidad si el investigador coloca sistemáticamente el objeto en el mismo sitio mientras lo nombra.

predictiva en una red neuronal artificial. (Las redes neuronales, una clase de algoritmos informáticos inspirados en el cerebro humano, adaptan de forma progresiva sus parámetros internos para generar, a partir de una entrada, la salida requerida.) En ese experimento, publicado en 1999 en *Nature Neuroscience*, los investigadores simularon las conexiones neuronales de la corteza visual, incluidas las descendentes (que transmiten pronósticos) y las ascendentes (que llevan las señales sensoriales del mundo exterior). Tras entrenar la red con fotografías de naturaleza, vieron que aprendía a reconocer las características clave de una imagen; por ejemplo, las rayas de una cebra.

CONTANDO CON LOS DEDOS

Una diferencia fundamental entre los seres humanos y muchos sistemas actuales de IA estriba en que nosotros disponemos de un cuerpo que nos sirve para desplazarnos por el mundo y actuar en él. Los bebés y los niños de uno o dos años se desarrollan experimentando con los movimientos de sus brazos, piernas y dedos, y examinando todo aquello que cae dentro de su alcance. Aprenden de forma autónoma a andar, a hablar y a reconocer objetos y personas. De qué modo lo consiguen sin necesitar apenas orientación constituye un área clave de investigación tanto para psicólogos del desarrollo como para robotistas. Las colaboraciones entre ellos están conduciendo a sorprendentes hallazgos en ambos campos.

En una serie de experimentos pioneros que se iniciaron a finales de los noventa, el robotista Jun Tani, a la sazón en los Laboratorios de Ciencias de la Computación de Sony, diseñó junto con otros investigadores una red neuronal que se basaba en predicciones para aprender movimientos básicos y la puso a prueba en robots. Descubrió que las máquinas podían lograr ciertas habilidades rudimentarias, como navegar por entornos simples, imitar movimientos de las manos y obedecer órdenes verbales básicas, como «apuntar» y «tocar».

En trabajos más recientes, el robotista Angelo Cangelosi, de la Universidad de Plymouth, y Linda B. Smith, psicóloga del desarrollo de la Universidad de Indiana en Bloomington, han demostrado el papel crucial que desempeña el cuerpo en la adquisición de conocimientos. «La forma del cuerpo [del robot] y la clase de cosas que puede hacer influyen en las experiencias que tiene y en lo que puede aprender de ellas», asegura Smith. Uno de los principales sujetos de prueba es iCub, un robot humanoide de poco menos de un metro de altura que un equipo del Instituto Italiano de Tecnología construyó con fines de investigación. No incorpora ninguna función preprogramada, lo que permite que se implementen algoritmos específicos para cada experimento.

En un estudio realizado en 2015, Cangelosi, Smith y sus colegas dotaron a un iCub de una red neuronal que le otorgaba la capacidad de establecer asociaciones simples. Hallaron que asimilaba nuevas palabras con mayor facilidad si los nombres de los objetos se vinculaban sistemáticamente con posiciones corporales específicas. Colocaron repetidas veces una pelota o una copa a la izquierda o a la derecha del androide, de modo que vinculara el objeto con el movimiento requerido para mirarlo, como inclinar la cabeza. Después, emparejaron las acciones con los nombres de esos objetos. El robot aprendía mejor palabras básicas si los objetos correspondientes aparecían en una ubicación determinada en vez de en múltiples sitios.

Cuando repitieron el experimento con niños de 16 meses, llegaron a resultados similares: relacionar objetos con posturas concretas les ayudaba a aprender asociaciones de palabras. El laboratorio de Cangelosi está extendiendo esta técnica para enseñar a los robots palabras más complejas, como *este* o *aquel*, que no se hallan asociadas a cosas específicas.

El uso del cuerpo puede, además, favorecer que los niños y los robots adquieran destrezas numéricas básicas. Los estudios muestran que los niños que encuentran dificultades para visualizar mentalmente sus dedos también poseen capacidades aritméticas más flojas. En un trabajo del año 2014, Cangelosi y su equipo descubrieron que cuando se enseñaba a los robots a contar con los dedos, sus redes neuronales representaban cantidades con mayor exactitud que cuando se les instruía utilizando solo los nombres de los números.

MOTORES DE LA CURIOSIDAD

La novedad también facilita el aprendizaje. En un artículo publicado en 2015 en la revista *Science*, investigadores de la Universidad Johns Hopkins refirieron que, cuando los niños se topan con algo desconocido, como un objeto sólido que parece atravesar una pared, exploran ese fallo de sus expectativas. En términos prosaicos, su impulso inherente a reducir los errores de predicción les ayuda en su desarrollo.

Pierre-Yves Oudeyer, robotista del Instituto Nacional de Investigación en Informática y Automática (INRIA) de Francia, cree que el proceso de aprendizaje es más complejo. Sostiene

que los niños buscan activamente, y de manera sorprendentemente refinada, aquellos objetos de su entorno que les brindan mayores oportunidades para aprender. Por ejemplo, una niña pequeña preferirá jugar con un coche de juguete que con un rompecabezas de 100 piezas, pues posiblemente su nivel de conocimientos le permitirá formular hipótesis sobre el primero más sencillas de verificar.

Para corroborar esta teoría, Oudeyer y sus colegas dotaron a sistemas robóticos con una característica que denominan «motivación intrínseca», la cual premia la reducción en el error de predicción. (Para una máquina inteligente, la recompensa puede equivaler a un valor numérico que está programado para maximizarse en función de sus acciones.) Este mecanismo posibilitó que un robot AIBO de Sony (un pequeño artilugio, parecido a un cachorro de perro, con capacidades motoras y sensoriales básicas) buscara de forma autónoma aquellas tareas que ofrecían un mayor potencial de aprendizaje. Los cachorros robóticos fueron capaces de adquirir habilidades básicas (agarrar objetos, interactuar vocalmente con otro robot) sin necesidad de que se les programara para conseguir fines tan específicos. Este resultado es «un efecto secundario de la exploración del mundo que efectúa el robot, impulsada por su motivación para mejorar sus predicciones», explica Oudeyer.

Cabe destacar que, si bien los robots pasaron por fases de entrenamiento similares, el azar tuvo una función destacada en lo que aprendieron. Unos exploraron un poco menos, otros un poco más, de modo que acabaron conociendo cosas distintas. Para Oudeyer, esta variación de resultados sugiere que, incluso con una programación idéntica y un entorno educativo similar, los robots pueden alcanzar diferentes niveles de habilidad, algo parecido a lo que sucede en un aula típica.

Más recientemente, el grupo de Oudeyer recurrió a simulaciones por ordenador para mostrar que un tracto vocal robótico equipado con este tipo de algoritmo predictivo podía aprender elementos básicos del lenguaje. En la actualidad colabora con la neurocientífica cognitiva Jacqueline Gottlieb, de la Universidad de Columbia, para investigar si tal motivación intrínseca impulsada por predicciones también subyace a la neurobiología de la curiosidad humana. En su opinión, una investigación a fondo de estos modelos podría ayudar a los psicólogos a comprender lo que ocurre en el cerebro de niños con discapacidades y trastornos del desarrollo.

ANDROIDES ALTRUISTAS

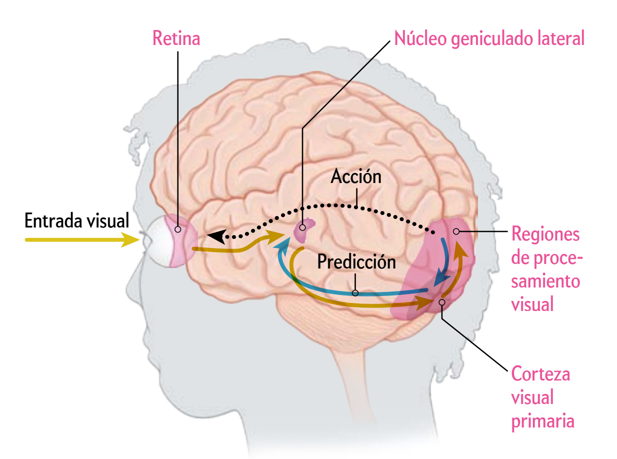
Nuestro cerebro también trata de predecir el futuro cuando interactuamos con otras personas: intentamos deducir sin cesar las intenciones de la gente y anticipar lo que dirán a continuación. Sorprendentemente, el impulso a minimizar los errores de predicción puede inducir por sí solo una conducta social elemental, como demostraron en 2016 la robotista Yukie Nagai y su grupo de la Universidad de Osaka.

Los investigadores hallaron que, incluso cuando el robot iCub no era programado con una capacidad intrínseca de socializar, la motivación para reducir los errores de predicción lo conducía a comportarse de manera servicial. Por ejemplo, después de haberle enseñado a empujar un camión de juguete, si el robot observaba que una persona no lograba completar esa misma acción, a menudo él mismo desplazaba el objeto al lugar correcto, simplemente para aumentar la certeza de que el camión se encontraba en una ubicación dada. Nagai, actualmente en el Instituto Nacional de Tecnología de la Información y Comunicación de Japón, cree que es posible que el desarrollo

UN PROCESO CLAVE

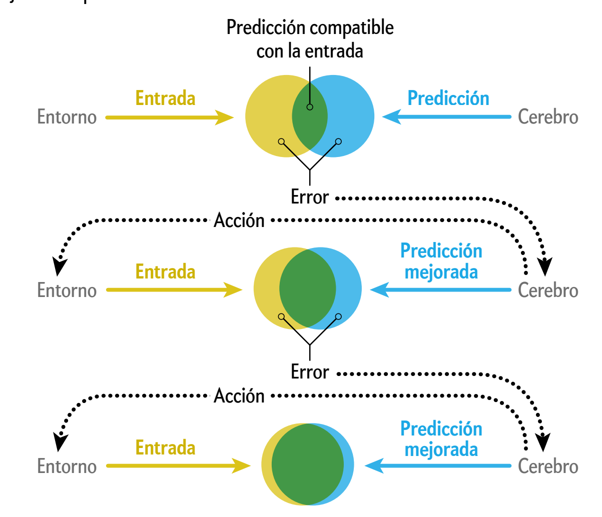
Cerebro predictivo

Nuestra mente es una máquina predictiva que utiliza los conocimientos y la experiencia previa para dar sentido a la avalancha de información que procede de nuestros alrededores. Muchos neurocientíficos y psicólogos creen que casi todo lo que hacemos —percepción, acción y aprendizaje— se basa en la generación y actualización de previsiones.



Procesamiento visual

La anatomía del cerebro respalda la idea del procesamiento predictivo. La corteza visual, por ejemplo, recibe información captada por el ojo, pero sus conexiones también funcionan en sentido contrario. Los neurocientíficos creen que estas conexiones que «descienden» desde los niveles superiores del cerebro hasta los inferiores (como la corteza visual primaria y el núcleo geniculado lateral) transportan predicciones. Estas se conjugan con las entradas sensoriales para generar un error de predicción: la diferencia entre lo que esperamos y lo que vemos. Una señal que codifica esta discrepancia regresa a los niveles superiores del cerebro. Otras señales descendentes envían las órdenes para mover los músculos oculares y ajustar lo que vemos.



Cascada de predicciones

Cuando el cerebro genera un error de predicción, utiliza esta información para actualizar sus previsiones y seleccionar las acciones que ayudarán a resolver la discrepancia entre creencias y realidad. Por ejemplo, si al mirar algo un individuo no es capaz de determinar qué es, el cerebro puede enviar la orden de tomar el objeto con la mano y examinarlo a fin de recopilar más información.

MESA SCHUMACHER (*cerebro*); AMANDA MONTAÑEZ (*diagrama*)

infantil se produzca de forma similar. «No hace falta que el niño tenga intención de ayudar a otras personas», argumenta. La motivación para minimizar el error de predicción puede por sí sola iniciar habilidades sociales elementales.

El procesamiento predictivo también ayudaría a los científicos a comprender trastornos del desarrollo, como el autismo. Según Nagai, ciertos individuos autistas pueden presentar una mayor sensibilidad a los errores de predicción, lo cual convierte en abrumadora toda la información sensorial entrante y explicaría su atracción por las conductas repetitivas, cuyas consecuencias resultan sumamente predecibles.

Harold Bekkering, psicólogo cognitivo de la Universidad de Radboud en los Países Bajos, cree que el procesamiento predictivo también contribuiría a explicar el comportamiento de las personas con trastorno por déficit de atención e hiperactividad. De acuerdo con esta teoría, mientras que los individuos autistas tenderían a protegerse de lo desconocido, aquellos que muestran problemas para concentrarse se verían atraídos permanentemente por los estímulos impredecibles de su entorno, explica Bekkering. «Algunas personas que son sensibles al mundo lo exploran, mientras que otras que son demasiado sensibles al mundo se blindan a sí mismas», sugiere. «En un marco de codificación predictivo se pueden simular muy bien ambas pautas.» En la actualidad, su laboratorio trabaja en la comprobación de esta hipótesis mediante el uso de imágenes del cerebro humano.

Nagai espera evaluar esta teoría efectuando estudios de «reflejo cognitivo», en los que robots equipados con algoritmos de aprendizaje predictivo interactuarán con seres humanos. A medida que el robot y la persona se comuniquen mediante lenguaje corporal y expresiones faciales, la máquina ajustará su comportamiento al de su interlocutor, reproduciendo de ese modo las preferencias de la persona en cuanto a predictibilidad. Así, los investigadores podrán emplear robots para modelizar la cognición humana, y luego examinar la arquitectura neuronal de la máquina para intentar descifrar lo que ocurre en nuestro cerebro. «Podremos exteriorizar en los robots nuestras características para comprendernos mejor a nosotros mismos», vaticina Nagai.

LOS ROBOTS DEL FUTURO

Los estudios con niños robóticos han ayudado a responder ciertas preguntas clave en psicología, incluida la importancia tanto del procesamiento predictivo como del cuerpo en el desarrollo cognitivo. «Hemos aprendido mucho acerca de cómo funcionan los sistemas complejos, de la importancia que tiene el cuerpo y de algunos aspectos verdaderamente fundamentales, como la exploración y la predicción», señala Smith.

Sin embargo, los robots capaces de desarrollar una inteligencia similar a la humana distan de convertirse en realidad. Chappie aún habita en el reino de la ciencia ficción. Para empezar, los científicos han de vencer obstáculos técnicos, como la fragilidad del cuerpo y las limitadas capacidades sensoriales de la mayoría de los robots. (En este sentido, los avances en campos como la robótica blanda y la visión artificial podrían aportar soluciones.) La increíble complejidad del propio cerebro representa un desafío aún mayor. A pesar de los esfuerzos que se realizan en numerosos frentes para obtener modelos de la mente, aún queda lejos la posibilidad de diseñar una máquina capaz de rivalizar con ella. «Disiento totalmente de quienes aseguran que dentro de 10 o 20 años tendremos máquinas con una inteligencia de nivel humano», declara Oudeyer. «Creo que esa afirmación denota una profunda falta de comprensión acerca de la complejidad de la inteligencia humana.»

Además, la inteligencia no solo necesita una maquinaria y circuitos apropiados. Una larga línea de investigación ha demostrado que los cuidadores desempeñan un papel crucial en el desarrollo infantil. «Si me preguntan si un robot podría llegar a ser verdaderamente humano, entonces yo preguntaré si alguien cuidaría a un robot como cuida a un niño», dice Tani. «En caso de que sea posible, entonces sí, podríamos conseguirlo. Pero de lo contrario no cabe esperar que un robot se desarrolle como un niño humano real.»

El proceso de acumulación gradual de conocimientos también puede resultar indispensable. «El desarrollo es un sistema de cascadas extremadamente complejo», señala Smith. «Lo que sucede un día prepara el terreno para el siguiente.» Como consecuencia, argumenta, quizá no sea posible construir una inteligencia artificial de nivel humano sin integrar de algún modo el proceso de aprendizaje paso a paso que tiene lugar a lo largo de la vida.

Poco antes de su muerte, Richard Feynman escribió: «Lo que no puedo crear, no lo entiendo». En el libro que publicó en 2016, *Exploring robotic minds* («Explorar las mentes robóticas»), Tani da un giro a esta idea y sostiene: «Entiendo aquello que puedo crear». Argumenta que la mejor forma de entender la mente humana es sintetizando una.

Quizás algún día los seres humanos logremos construir un robot capaz de explorar, adaptarse y desarrollarse como un niño, tal vez junto con sustitutos de cuidador que le brinden el afecto y la orientación necesarios para un crecimiento saludable. Entretanto, los robots de tipo infantil continuarán proporcionando información valiosa acerca de cómo aprenden los niños y revelando lo que sucede cuando los mecanismos básicos se desvían de su funcionamiento normal. IyC

PARA SABER MÁS

Developmental robotics: From babies to robots. Angelo Cangelosi y Matthew Schlesinger. MIT Press, 2015.

Exploring robotic minds: Actions, symbols, and consciousness as self-organizing dynamic phenomena. Jun Tani. Oxford University Press, 2016.

How evolution may work through curiosity-driven developmental process. Pierre-Yves Oudeyer y Linda B. Smith en *Topics in Cognitive Science*, vol. 8, n.º 2, págs. 492-502, abril de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Así piensan los bebés. Alison Gopnik en *IyC*, septiembre de 2010.

Metal bípedo. John Pavlus en *IyC*, octubre de 2016.

Hacia una inteligencia artificial más humana. Alison Gopnik en *IyC*, septiembre de 2017.

REPRESENTACIÓN ARTÍSTICA de un planeta imaginario y su luna en torno a una enana roja. Ambos objetos están bañados por el cálido brillo de la estrella y sus fulguraciones.

EXOPLANETAS

SOMBRAS DE OTROS

Dos innovadoras misiones, TESS y CHEOPS, comenzarán este año a buscar y a estudiar en detalle nuevos planetas extrasolares

Joshua N. Winn

MUNDOS

EN SÍNTESIS

El satélite más prolífico en la búsqueda de exoplanetas, el telescopio espacial Kepler, de la NASA, dejará pronto de funcionar. Este año, dos nuevas misiones tomarán el relevo.

El Satélite de Sondeo de Exoplanetas en Tránsito (TESS), proyectado por la NASA, y el Satélite para la Caracterización de Exoplanetas (CHEOPS), de la ESA, buscarán nuevos mundos por el método de los tránsitos planetarios.

Ambas misiones deberían añadir numerosos planetas a una lista cada vez más larga. Con ello esperan ayudar a responder a dos preguntas clave: ¿Hay otros mundos habitables? ¿Hay vida más allá de la Tierra?

Joshua N. Winn es astrofísico de la Universidad de Princeton experto en la formación y evolución de planetas extrasolares. Fue miembro de la misión Kepler, de la NASA, y forma parte del equipo del nuevo Satélite de Sondeo de Exoplanetas en Tránsito (TESS).



La mañana del 21 de agosto de 2017, en un prado de Midvale, en Idaho, mi familia y yo aguardábamos expectantes. En unos minutos nos envolvería la sombra de la Luna. Junto a millones de otras personas que se habían trasladado hasta una estrecha franja que iba de Oregón a Carolina del Sur, estábamos a punto de presenciar un eclipse total de Sol.

Después me pregunté cuántos jóvenes astrónomos habrían nacido en ese preciso instante, cautivados por el sobrecogedor crepúsculo diurno y la singular vista de la candente corona solar. Los eclipses han sido una fuente de inspiración y conocimiento desde hace siglos, y aún lo son. Mi propia investigación se basa en ellos. Sin embargo, no se trata de eclipses solares, sino de otros de un tipo muy distinto: los «tránsitos» de exoplanetas. En realidad, los telescopios no pueden observar la silueta de un planeta que pasa por delante de su estrella si esta se encuentra a años luz de distancia. Sin embargo, la minúscula disminución de brillo que se produce cuando el objeto bloquea una pequeña parte de la luz del astro sí basta para revelar la existencia de un mundo extrasolar.

Los astrónomos detectaron el primer tránsito exoplanetario en 1999. Una década después, ya se había superado el centenar. Hoy conocemos unos 3000, gracias principalmente a la misión Kepler, de la NASA, la cual finalizará este año. Aunque el método de los tránsitos es el más eficaz para encontrar mundos distantes, más de 700 exoplanetas se han descubierto mediante otras técnicas. Como resultado, hemos hallado una enorme diversidad de mundos, más de lo que había predicho ninguna teoría de formación planetaria. Y sospechamos que no hemos hecho más que rozar la superficie de un vasto océano.

Este año, tanto la NASA como la Agencia Espacial Europea (ESA) tienen pensado lanzar sendos telescopios dedicados a estudiar planetas en tránsito. Mientras tanto, varios observa-

PÁGINAS ANTERIORES: RON MILLER

CÓMO LEER ESTE MAPA

Cada punto es una estrella, situada en el mapa según su ascensión recta (el equivalente astronómico de la longitud) y declinación (latitud). ¿La proyección no le resulta familiar? Imagine que el cielo nocturno es una esfera con la Tierra en su centro. La eclíptica es el plano del sistema solar.

El halo alrededor de cada punto representa el brillo de la estrella tal y como se percibe desde la Tierra.

- Muy brillante
- Apenas puede verse a simple vista
- 100 veces más tenue
- 10.000 veces más tenue

Los puntos rojos (hay 1650) son estrellas con planetas confirmados descubiertos por la misión Kepler. ¿Qué es ese extraño cuadriculado? Los cuadrados distorsionados corresponden a las cámaras CCD (dispositivo de carga acoplada) del telescopio. Kepler observó una pequeña parcela del cielo, por lo que sus hallazgos están todos agrupados.

Los puntos azules son estrellas con planetas confirmados descubiertos por otros proyectos distintos de Kepler. La mayoría son planetas gigantes, más fáciles de detectar que los pequeños. El objetivo de TESS son estrellas brillantes en las que puedan observarse planetas de tamaño reducido.

torios terrestres situados en cumbres montañosas están extendiendo la búsqueda a otros tipos de estrellas. Y esto no es más que el principio, ya que en 2026 la ESA tiene pensado lanzar un impresionante telescopio espacial destinado también a la detección de eclipses.

EL PANORAMA HASTA AHORA

Gran parte de lo que hoy sabemos sobre exoplanetas se lo debemos a Kepler. Tras su lanzamiento, en 2009, el telescopio comenzó a orbitar alrededor del Sol y a observar de manera ininterrumpida una región del cielo situada entre las constelaciones de Cisne y Lira, donde monitoriza el brillo de unas 150.000 estrellas. En 2013 se vio obligado a modificar su misión tras el fallo de dos de sus ruedas de reacción, que lo mantienen orientado en la dirección correcta. Pero, sorprendentemente, aún así ha seguido realizando descubrimientos.

Y eso a pesar de que los eclipses son poco frecuentes. Kepler solo encontró pruebas de tránsitos planetarios en un pequeño porcentaje de las estrellas que examinó. Esas atenuaciones de brillo delatan la existencia de un planeta con una órbita casi perfectamente alineada con la línea de visión desde la Tierra, lo que provoca un diminuto eclipse parcial cada vez que el objeto pasa por delante de su estrella. Esa disminución relativa de brillo nos da el área de la silueta del planeta en relación con la sección transversal de la estrella, por lo que los cuerpos más grandes resultan más fáciles de detectar. Por ejemplo, visto desde lejos, el tránsito de Júpiter por delante del Sol produciría una caída del 1 por ciento de su brillo, mientras que la pérdida de luz durante un eclipse causado por la Tierra sería de apenas el 0,01 por ciento. Los telescopios terrestres no son capaces de detectar señales tan exiguas, ya que la atmósfera perturba en exceso la luz de las estrellas. Así pues, estas búsquedas requieren el uso de telescopios espaciales.

Kepler ha encontrado unos 5000 posibles planetas, más de 2600 de los cuales han sido confirmados por estudios posteriores. La mayoría de ellos se dividen en dos categorías: los que tienen un tamaño similar al de la Tierra o algo mayor («supertierras»), y los que son un poco menores que nuestro octavo planeta («minineptunos»). La mayoría de los sistemas planetarios descubiertos por Kepler constan de un solo planeta conocido, si bien hay cientos de ellos donde se han detectado varios, e incluso uno, descubierto hace poco, con ocho: los mismos que el sistema solar. Estas cifras reflejan tanto los sesgos observacionales de Kepler (más preparado para detectar objetos grandes) como la distribución general de planetas en la galaxia.

Algunos de los hallazgos de Kepler han sido toda una sorpresa. Su descubrimiento más transcendental es, en mi opinión, el de sistemas solares en miniatura: hasta seis planetas apiñados alrededor de una estrella con órbitas menores que la que describe Mercurio alrededor del Sol. Su importancia estriba en que son bastante comunes: si apuntamos al azar a una estrella similar al Sol, tendremos un 50 por ciento de posibilidades de que tenga al menos un planeta mayor que la Tierra en una órbita menor que la de Mercurio. Nadie había vaticinado que tales objetos pudieran ser comunes, y, de hecho, algunas de las teorías más detalladas predecían que serían muy infrecuentes. Esto parece

ARCHIVO DE EXOPLANETAS DE LA NASA (*estrellas anfitrionas conocidas*); «PLANET DETECTION SIMULATIONS FOR SEVERAL POSSIBLE TESS EXTENDED MISSIONS», L. G. BOUMA ET AL. ARTÍCULO ENVIADO A ARXIV.ORG EL 24 DE MAYO DE 2017 (*objetivos de TESS*); JAN WILLEM TULP (*gráficos*)

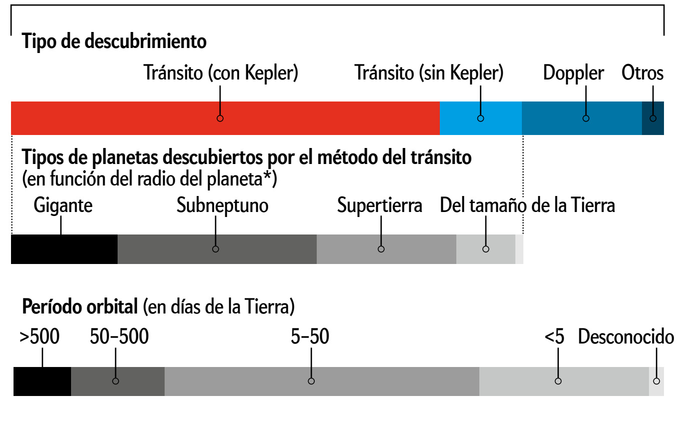
ASÍ SON

Censo de exoplanetas

La ciencia de exoplanetas comenzó a despegar a mediados de los años noventa. Desde entonces, los astrónomos han compilado un catálogo que ya incluye más de 3700 planetas en órbita alrededor de otras estrellas. Sin embargo, es probable que solo constituyan una pequeña fracción de los planetas que existen. La mayoría de los descubrimientos realizados hasta la fecha proceden del telescopio Kepler, de la NASA, que pronto terminará su misión. Este año, dos nuevos observatorios espaciales recogerán el testigo: el Satélite de Sondeo de Exoplanetas en Tránsito (TESS), de la NASA, y el Satélite para la Caracterización de Exoplanetas (CHEOPS), de la ESA.



Los puntos amarillos son estrellas simuladas en las que TESS buscará planetas. La simulación se basa en la precisión de TESS y en lo que sabemos sobre la distribución estadística de planetas. Los objetivos se agrupan alrededor de los polos de la eclíptica porque esas son las áreas donde TESS obtendrá más datos.



* *Se muestran las categorías de planetas adoptadas por la misión TESS, aunque estas son algo arbitrarias. Otros grupos usan diferentes definiciones para cada tipo de planeta.*

indicar que hay algo clave que estamos pasando por alto en la teoría estándar de formación de planetas.

Kepler también ha encontrado algunos planetas extraños que sí habían sido considerados con anterioridad... pero por autores de ciencia ficción. Uno de mis favoritos es KOI 1843.03, un planeta con el tamaño de la Tierra situado tan cerca de su estrella que el hemisferio iluminado debe de estar a miles de grados. Su superficie probablemente se encuentre cubierta por océanos de magma, como el planeta Mustafar de *La guerra de las galaxias*, donde tuvo lugar el apoteósico duelo de espadas láser entre Obi-Wan y Anakin. La órbita de KOI 1843.03 es tan diminuta que el astro solo necesita 4,25 horas para completarla. Otro planeta, Kepler-16b se parece al mundo donde creció Luke Skywalker, Tatooine: en su cielo brillan dos soles, ya que orbita en torno a un sistema binario de estrellas que giran una alrededor de la otra.

Otro ejemplo exótico es Kepler-36, donde dos planetas comparten prácticamente la misma órbita, lo que hace que interaccionen de manera caótica. Incluso si supiéramos sus posiciones actuales con una precisión de un metro, no habría manera de predecir su ubicación dentro de unos decenios: una versión planetaria del «efecto mariposa». En la Tierra, la Revolución Científica comenzó con la comprensión del movimiento de los planetas. Imagine cuán difícil lo tendría un científico que hubiese nacido en el sistema Kepler-36.

El telescopio Kepler fue diseñado para responder a una pregunta antiquísima: ¿cuán frecuentes o raros son los «planetas similares a la Tierra»? Con este término solemos referirnos a planetas con un tamaño y una masa similares a los terrestres y en los que sea verosímil que haya océanos de agua líquida. Para ello, el planeta debe estar situado a una distancia de su estrella donde la temperatura sea lo bastante elevada como para derretir el hielo, pero no tanto como para vaporizarlo. El intervalo de distancias en el que se cumplen tales condiciones se conoce como «zona habitable». Creemos que el agua líquida desempeñó un papel clave en el origen de la vida en la Tierra, por lo que quizás ocurra lo mismo en otros lugares.

Kepler ha encontrado alrededor de una docena de planetas posiblemente rocosos en la zona habitable de su estrella. ¿No responde eso a nuestra pregunta? Parece que bastaría con dividir esa cifra por el número de estrellas estudiadas por Kepler y calcular el porcentaje que poseen planetas similares al nuestro. Sin embargo, el cálculo es mucho más complejo. No es evidente cuántas de las estrellas observadas por Kepler eran lo bastante pequeñas, brillantes y estables como para que el telescopio pudiera detectar planetas parecidos a la Tierra a su alrededor. Calcularlo requerirá aproximadamente otro año para analizar bien los datos y determinar las propiedades de esas estrellas.

UNA NUEVA VENTANA

Por mucho que nos gustase, Kepler tenía un defecto: apuntaba principalmente en una única dirección, de modo que solo podía explorar el 0,25 por ciento del cielo. Para compensarlo, tenía que observar estrellas muy lejanas a fin de contar con una muestra suficiente. Así, las estrellas estudiadas por Kepler se encuentran por lo general a miles de años luz de distancia.

Como cualquier astrónomo, disfruto deslumbrando a mi audiencia con historias de objetos situados a miles de billones de kilómetros. Pero, desde un punto de vista práctico, la distancia acarrea dificultades. La luz de las estrellas lejanas llega a nuestros telescopios con cuentagotas, lo que limita la precisión de nuestros datos y nos imposibilita efectuar algunas mediciones. Por ejemplo, hoy por hoy no podemos determinar las masas de la mayoría de los planetas descubiertos por Kepler. La señal del tránsito nos proporciona el diámetro de un planeta, pero no su masa, por lo que ignoramos cómo es. ¿Denso y rocoso, como la Tierra; difuso y gaseoso, como Júpiter y Saturno; o algo intermedio? Eso solo podemos saberlo si conocemos tanto el diámetro como la masa del planeta.

La forma habitual de determinar la masa consiste en medir la aceleración que experimenta la estrella anfitriona como respuesta al tirón gravitatorio del planeta: cuanto mayor sea la masa, mayor será la atracción que ejercerá sobre la estrella. A su vez, el movimiento de la estrella puede medirse gracias al efecto Doppler, el pequeño cambio en la longitud de onda que tiene lugar cuando la estrella se acerca o se aleja de nosotros. (De hecho, esta técnica también permite descubrir planetas, ya que es posible detectar el «vaivén» de una estrella incluso si el planeta no la eclipsa.) Pero a tal fin hemos de emplear espectroscopía de alta resolución: descomponer la luz de la estrella en sus colores constituyentes y medir su intensidad en unas 50.000 longitudes de onda o más. Con las estrellas lejanas y tenues no disponemos de luz suficiente para hacer eso.

La próxima misión de la NASA, el Satélite de Sondeo de Exoplanetas en Tránsito (TESS), pretende resolver este problema. A bordo habrá cuatro telescopios de 10 centímetros de diámetro, diez veces menores que el de Kepler. Esto tal vez parezca extraño, ya que lo habitual en astronomía es que cada misión emplee telescopios mayores que su predecesora. Sin embargo, un telescopio menor permite un campo de visión más amplio. Cada una de las cámaras de TESS explorará una parte de cielo casi seis veces mayor que la que cubría Kepler. Además, TESS rotará para poder observar en diferentes direcciones. En última instancia, debería de estudiar muchísimas más estrellas brillantes que las pocas que caían en el pequeño campo de visión de Kepler. [En el momento de enviar este artículo a imprenta, el lanzamiento de TESS estaba previsto para el 16 de abril.]

Durante los próximos dos años, TESS barrerá casi el 90 por ciento del cielo, dividiéndolo en 26 sectores parcialmente superpuestos y observando cada uno cerca de un mes. Al igual que Kepler, esperamos que TESS descubra miles de planetas. Pero estos se hallarán en estrellas que, por lo general, serán unas 30 veces más brillantes. Eso será de gran ayuda cuando usemos los telescopios terrestres para examinarlas: parecerá que la capacidad colectora de luz de los telescopios se habrá multiplicado por 30 en comparación con lo que ocurría con Kepler.

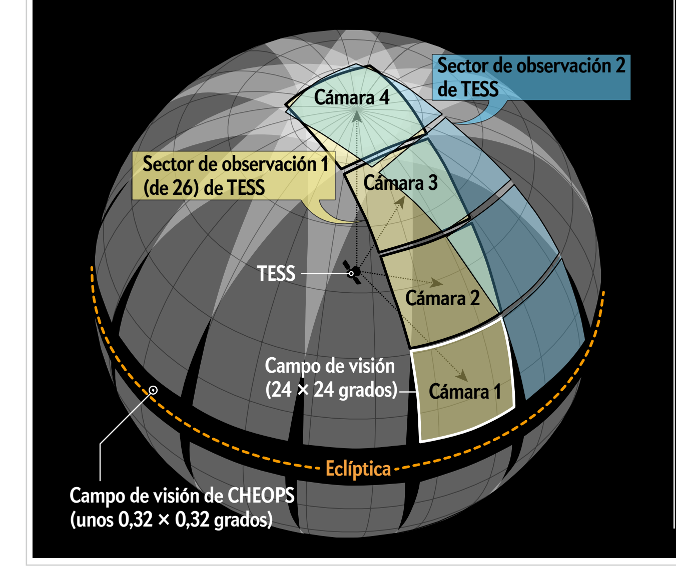
Poco después de TESS llegará el Satélite para la Caracterización de Exoplanetas (CHEOPS), una misión europea cuyo lanzamiento está previsto para finales de 2018. CHEOPS tendrá un solo telescopio de 32 centímetros que cumplirá una función distinta y complementaria: mientras que TESS explorará amplias

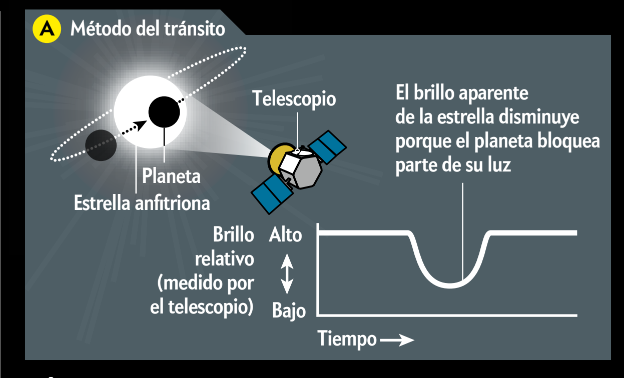
Búsqueda de planetas

La mejor herramienta que tienen los astrónomos para encontrar exoplanetas alrededor de otras estrellas, el telescopio espacial Kepler, pronto terminará su misión. Para reemplazarlo, este año se lanzarán dos nuevos observatorios: el Satélite de Sondeo de Exoplanetas en Tránsito (TESS) y el Satélite para la Caracterización de Exoplanetas (CHEOPS).

PLAN DE OBSERVACIÓN

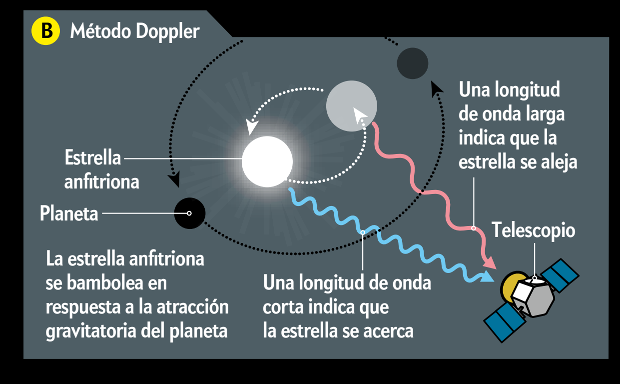
Mientras Kepler busca planetas en una pequeña área del cielo, TESS será capaz de examinar alrededor del 90 por ciento de la esfera celeste. Las cuatro cámaras del telescopio le brindarán un gran campo de visión, que cubrirá 24 por 96 grados. Dividirá el cielo en 26 sectores de observación parcialmente superpuestos y se pasará un mes estudiando cada uno. CHEOPS, por el contrario, estudiará estrellas individuales en las que los astrónomos ya sospechen que existen mundos a fin de obtener mejores datos.





CÓMO ENCONTRAR PLANETAS

Los telescopios Kepler, TESS y CHEOPS buscan planetas mediante el método de los tránsitos (A). Cuando un planeta pasa por delante de su estrella según se ve desde la Tierra, bloquea parte de la luz. Esas minúsculas disminuciones de brillo permiten identificar planetas demasiado tenues para verlos directamente. Una segunda técnica, el método de la velocidad radial (B), busca estrellas que ejecutan un ligero vaivén. Si el efecto Doppler revela que una estrella se mueve hacia delante y hacia atrás siguiendo una pauta regular, cabe deducir que hay un planeta cercano cuya atracción gravitatoria «sacude» la estrella a medida que orbita a su alrededor. Al contrario que el método de los tránsitos, esta técnica no requiere que la estrella y la órbita del planeta estén alineados con la línea de visión desde la Tierra.



JEN CHRISTIANSEN

franjas del cielo, CHEOPS apuntará a estrellas concretas donde se sospeche que hay un planeta y obtendrá mejores datos.

Por ejemplo, supongamos que TESS encuentra indicios poco firmes de la existencia de un planeta interesante. En tal caso, los científicos de TESS contactaríamos a los de CHEOPS para preguntarles si pueden obtener datos más precisos. O consideremos Próxima Centauri y Ross 128, dos estrellas cercanas que sufren el tirón gravitatorio de sendos planetas de masa similar a la de la Tierra, como sabemos gracias a la técnica Doppler. CHEOPS podrá investigar sus posibles eclipses. El telescopio aún necesitará algo de suerte, pues la probabilidad de que sus órbitas estén alineadas con nuestra línea de visión es pequeña (para Próxima Centauri, de un 1,4 por ciento). Pero, si sucede, aprenderemos mucho más sobre esos planetas de lo que podríamos haber conseguido por cualquier otro medio.

ESTRELLAS PEQUEÑAS

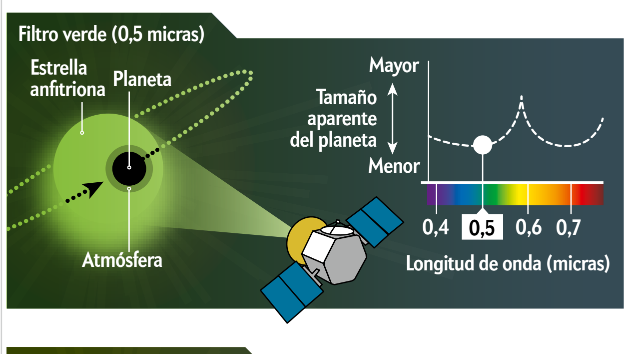
Estas nuevas herramientas nos permitirán dar el siguiente paso en la búsqueda de exoplanetas, pero también presentan sus inconvenientes. Para estar seguros de que el oscurecimiento de una estrella se debe a un tránsito planetario y no a un problema del instrumento, nos gustaría ver que el fenómeno se repite al menos una vez, y preferiblemente muchas. TESS, sin embargo, contemplará cualquier estrella solo durante un mes, un tiempo a todas luces insuficiente para ver más de un tránsito de aquellos planetas que, como la Tierra, tarden cerca de un año en completar su órbita. Hay una pequeña franja de cielo (allí donde se superponen todos sus sectores de observación) que TESS estudiará durante un año. Pero eso seguirá siendo mucho menor que los cuatro años que pasó Kepler sin apartar la mirada.

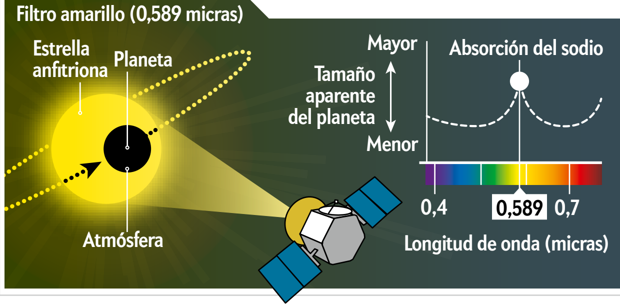
Como resultado, TESS se limitará sobre todo a encontrar planetas con períodos de pocas semanas o menos, una situación que no es la ideal. Ese fue el principal aspecto en el que los científicos tuvimos que transigir para ajustar la misión a un presupuesto de 228 millones de dólares. Decidimos que era una buena concesión porque Kepler nos ha enseñado que los planetas con órbitas cortas son muy variados: mundos de lava, planetas hinchados de baja densidad, otros que interaccionan de manera caótica e incluso algunos que parecen estar desintegrándose debido al tremendo calor de sus estrellas. TESS encontrará ejemplos más

ESPECTROS

Un vistazo a las atmósferas

Además de revelar la presencia de exoplanetas, los tránsitos pueden servir para determinar la composición de sus atmósferas. Cuando un planeta eclipsa su estrella, parte de la luz de esta atraviesa la atmósfera del planeta en su camino hacia la Tierra. Cada átomo o molécula absorbe luz en unas longitudes de onda características. Al analizar con filtros de colores la luz que llega de la estrella cuando el planeta pasa por delante y cuando se aparta a un lado, es posible deducir qué compuestos o elementos químicos se hallan presentes en su atmósfera.





cercanos y fáciles de estudiar de esos planetas exóticos. Sin embargo, para hallar uno parecido a la Tierra en una estrella similar al Sol aún tendremos que esperar.

Con todo, TESS cumple una función importante en la búsqueda a largo plazo de vida extraterrestre. Esperamos que TESS descubra en torno a una docena de planetas en la zona habitable, casi tantos como los que halló Kepler. La clave es renunciar a que la estrella se parezca al Sol. A los astrónomos nos gusta referirnos al Sol como una estrella ordinaria, una más de los cientos de miles de millones que hay en la Vía Láctea. Pero esto es una mentira piadosa. En realidad, el Sol está por encima de la media: la mayoría de las estrellas de nuestra galaxia son enanas rojas, astros mucho más fríos y tenues que el Sol y con menos de la mitad de su masa. Si el Sol fuera un foco de un escenario de Broadway, una enana roja sería una vela.

Hay que estar muy cerca de una vela para sentir el mismo calor que junto a un foco de luz. En consecuencia, la zona habitable de una enana roja se halla muy cerca de la estrella, donde los períodos orbitales son cortos. Convenientemente cortos: para una enana roja con una masa cinco veces menor que la del Sol, cualquier planeta en la zona habitable completaría su órbita en pocas semanas, lo que lo pondría al alcance de TESS.

Kepler ha observado unas cuantas miles de enanas rojas y ha descubierto que están repletas de planetas cercanos; presentan incluso más que las estrellas semejantes al Sol. Entre los pocos cientos de miles de estrellas que estudiará TESS hay unas 50.000 enanas rojas. Aunque son tenues, lo compensan con creces gracias a su reducido tamaño: este permite que los planetas cubran una gran parte de la estrella durante el tránsito, generando así una notable caída de brillo. Si un planeta cruza por delante de una estrella 16 veces menos brillante que otra, lo podremos detectar con la misma facilidad alrededor de cualquiera de ellas siempre que el radio de la primera sea la mitad que el de la segunda. De hecho, los planetas que pasan frente a las enanas rojas son tan notorios que ni siquiera es estrictamente necesario usar un telescopio espacial para detectarlos.

Por esta razón, ya hay varios proyectos que buscan planetas alrededor de enanas rojas con telescopios terrestres. Sin embargo, debido a que estas estrellas son tenues, los astrónomos emplean grandes telescopios, que necesariamente tienen un campo de visión reducido. Además, deben estudiar las estrellas una a una, por lo que necesitan mucho tiempo. Tras años de búsqueda, estos esfuerzos solo han dado con tres sistemas planetarios. Sin embargo, los tres se encuentran entre los descubrimientos más sensacionales del campo. Uno de ellos, TRAPPIST-1, copó titulares a principios de 2017: un minúsculo sistema con siete planetas del tamaño de la Tierra, apretados alrededor de un objeto con una masa tan diminuta que apenas puede considerarse una estrella. Al menos dos de esos siete planetas se encuentran en la zona habitable. (Se supone que el nombre TRAPPIST es un acrónimo, pero en realidad es una de las cervezas favoritas del investigador principal, el belga Michaël Gillon, que ahora ha bautizado otro proyecto más ambicioso como SPECULOOS, el nombre de unas galletas que también están entre sus preferidas.)

¿HAY ALGUIEN AHÍ?

Después de todas estas misiones, conoceremos miles de planetas en tránsito en torno a estrellas lo suficientemente brillantes para continuar estudiándolos en detalle. Podremos medir sus masas, aprender sobre su estructura y obtener más pistas sobre el proceso de formación planetaria. Y, si todo va bien, tendremos una colección cada vez mayor de mundos del tamaño de la Tierra y potencialmente habitables.

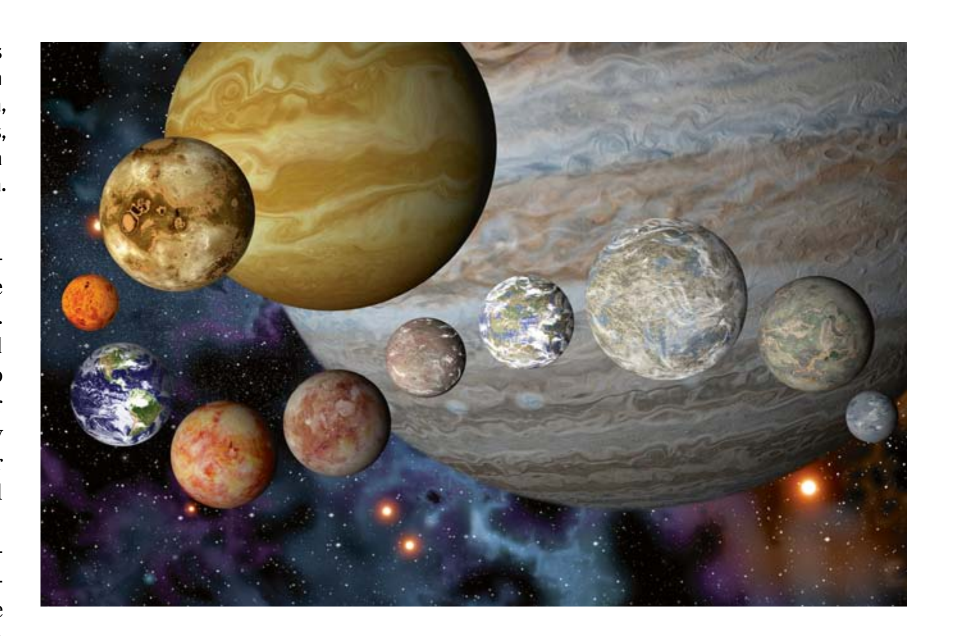
¿Y entonces qué? ¿Cómo dar el siguiente paso y averiguar si en algunos de esos planetas hay vida? La estrategia tradicional, defendida desde los años cincuenta, propone apuntar un gran radiotelescopio y esperar a sintonizar las transmisiones de alguna civilización inteligente. Aunque es un plan válido, ignoramos por completo si alguna vez funcionará.

Sin embargo, existe otra posibilidad: analizar la atmósfera del planeta en busca de signos de vida. Esto puede hacerse usando un pequeño truco durante el tránsito. Las capas más externas de la atmósfera de un planeta son translúcidas, así que cuando un planeta pasa por delante de su estrella, una pequeña porción de la luz de esta se filtra a través de la atmósfera planetaria y sale por el otro lado, donde continúa su camino hacia nosotros. Ello nos permite usar técnicas espectroscópicas para estudiar la composición de la atmósfera. Cada átomo o molécula absorbe luz de determinadas longitudes de onda. El átomo de sodio, por ejemplo, lo hace en un cierto tono amarillo anaranjado porque su electrón más externo puede absorber fácilmente la luz con una longitud de onda de 589 nanómetros.

Por tanto, el truco es observar el espectro de la estrella antes, durante y después del tránsito. Durante el tránsito, los átomos

JEN CHRISTIANSEN

MÚLTIPLES MUNDOS: Los planetas descubiertos hasta ahora incluyen gigantes gaseosos y mundos de lava, entre otras variedades exóticas. Algunos, sin embargo, parecen guardar una semejanza razonable con la Tierra.



RON MILLER

y moléculas de la atmósfera absorberán unos colores y no otros, con lo que cambiará el espectro que observemos. Concluido el tránsito, volvemos a ver el espectro de la estrella inalterado. Si lo hacemos con cuidado, podemos calcular la diferencia entre el espectro normal y el que vemos durante el tránsito y aislar los pequeños cambios causados por el planeta.

Esta técnica se ha aplicado a planetas en tránsito del tamaño de Júpiter e incluso a algunos del tamaño de Urano y Neptuno, lo que ha permitido descubrir compuestos como metano, monóxido de carbono y agua. Pero nunca la hemos usado con planetas del tamaño de la Tierra, ya que sus señales son exiguas y hasta ahora solo los hemos encontrado alrededor de estrellas muy distantes y tenues. Si alguna vez detectásemos oxígeno en la atmósfera de una exotierra, a todos se nos dispararía el corazón. La razón por la que la Tierra tiene tanto oxígeno en su atmósfera es gracias a la vida. Si esta desapareciera de repente, las rocas comenzarían a oxidarse y absorberían todo el oxígeno en pocos millones de años. Por tanto, un planeta con grandes cantidades de oxígeno tal vez señale el hogar de hombrecillos verdes o, al menos, de algún tipo de organismo. Así pues, la esperanza es que las próximas misiones encuentren planetas del tamaño de la Tierra en estrellas lo bastante brillantes para investigar las atmósferas de esos mundos.

En este sentido, TESS, CHEOPS y SPECULOOS actuarán como buscadores para el próximo gran observatorio de la NASA: el telescopio espacial James Webb. Esta maravilla tecnológica de 10.000 millones de dólares deberá lanzarse en 2020 y será, entre otras muchas cosas, la herramienta más potente con diferencia para realizar espectroscopía de tránsito. Sin embargo, su combustible se agotará en unos cinco o diez años, por lo que urge descubrir ya los objetivos más prometedores.

Dado que el tiempo de observación del James Webb estará muy solicitado, se han planteado dos telescopios espaciales dedicados en exclusiva a la espectroscopía de tránsito. La propuesta estadounidense se conoce como Explorador Rápido para la Espectroscopía de Exoplanetas en el Infrarrojo (FINESSE), mientras que la europea es el Gran Sondeo de Exoplanetas en el Infrarrojo para la Detección Remota de Atmósferas (ARIEL). La palabra *infrarrojo* aparece en ambos nombres porque las moléculas como el agua y el dióxido de carbono son más fáciles de detectar en esas longitudes de onda. La misión ARIEL fue aprobada por la ESA el pasado mes de marzo.

Aún más avanzados están los planes para PLATO, un telescopio espacial europeo cuyo lanzamiento está previsto para 2026. PLATO será una especie de super-TESS: con 24 telescopios en vez de cuatro, debería poder buscar planetas con más sensibilidad y durante más tiempo que sus predecesores.

Pero, además, la calidad de los datos de PLATO será lo suficientemente alta para detectar las variaciones de brillo asociadas a las oscilaciones intrínsecas de una estrella. Las estrellas, como cualquier cuerpo fluido, presentan ondas que en cierto modo son análogas a las ondas sísmicas en la Tierra, razón por la que su estudio recibe el nombre de astrosismología. Las propiedades de esas oscilaciones dependen de la estructura interna de la estrella, como su densidad y composición. Cuando PLATO encuentre un planeta, podremos entender mucho mejor las propiedades básicas de la estrella en torno a la cual orbita, incluida una que actualmente no somos capaces de determinar: su edad. Las oscilaciones revelan la edad del astro porque su núcleo convierte más y más hidrógeno en helio a medida que pasa el tiempo, lo que genera cambios sutiles en las ondas de la superficie. La astrosismología nos permite determinar si una estrella acaba de comenzar la fusión o si lleva 10.000 millones de años haciéndola. De esta manera, podremos estudiar cómo evolucionan los sistemas planetarios a lo largo del tiempo cósmico.

Entre el análisis de los datos de Kepler y las próximas misiones TESS, CHEOPS, James Webb y PLATO, la agenda de la búsqueda de planetas está llena. Por fin estamos listos para adentrarnos en ese vasto océano que acabamos de empezar a explorar. Y cuando todos esos jóvenes astrónomos en ciernes que quedaron deslumbrados por el eclipse solar del pasado verano crezcan, dispondrán de multitud de eclipses planetarios para realizar sus investigaciones. IyC

PARA SABER MÁS

Transiting Exoplanet Survey Satellite. George R. Ricker et al. en *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, vol. 1, n.º 1, 014.003, enero de 2015.

The search for exoplanets: What astronomers know. Curso impartido por Joshua Winn. The Great Courses, 2015. **www.thegreatcourses.com/courses/the-search-for-exoplanets-what-astronomers-know.html**

EN NUESTRO ARCHIVO

El amanecer de los exoplanetas. Michael D. Lemonick en *IyC*, septiembre de 2013.

Mundos con dos soles. William F. Welsh y Laurance R. Doyle en *IyC*, enero de 2014.

Hacia el primer exoplaneta con vida. Jonay I. González Hernández, Rafael Rebolo López y Enric Palle en *IyC*, marzo de 2014.

CARMENES, el detector de exotierras. José A. Caballero en *IyC*, mayo de 2016.

ARQUEOLOGÍA

CATEDRALES, SÍM

El gótico surgió en Francia a mediados del siglo XII, antes de lo que se supuso durante largo tiempo. Su lenta penetración en Centroeuropa apunta a influencias de origen político

Matthias Untermann



SERIE SOBRE ARQUEOLOGÍA
LUGARES DE CULTO

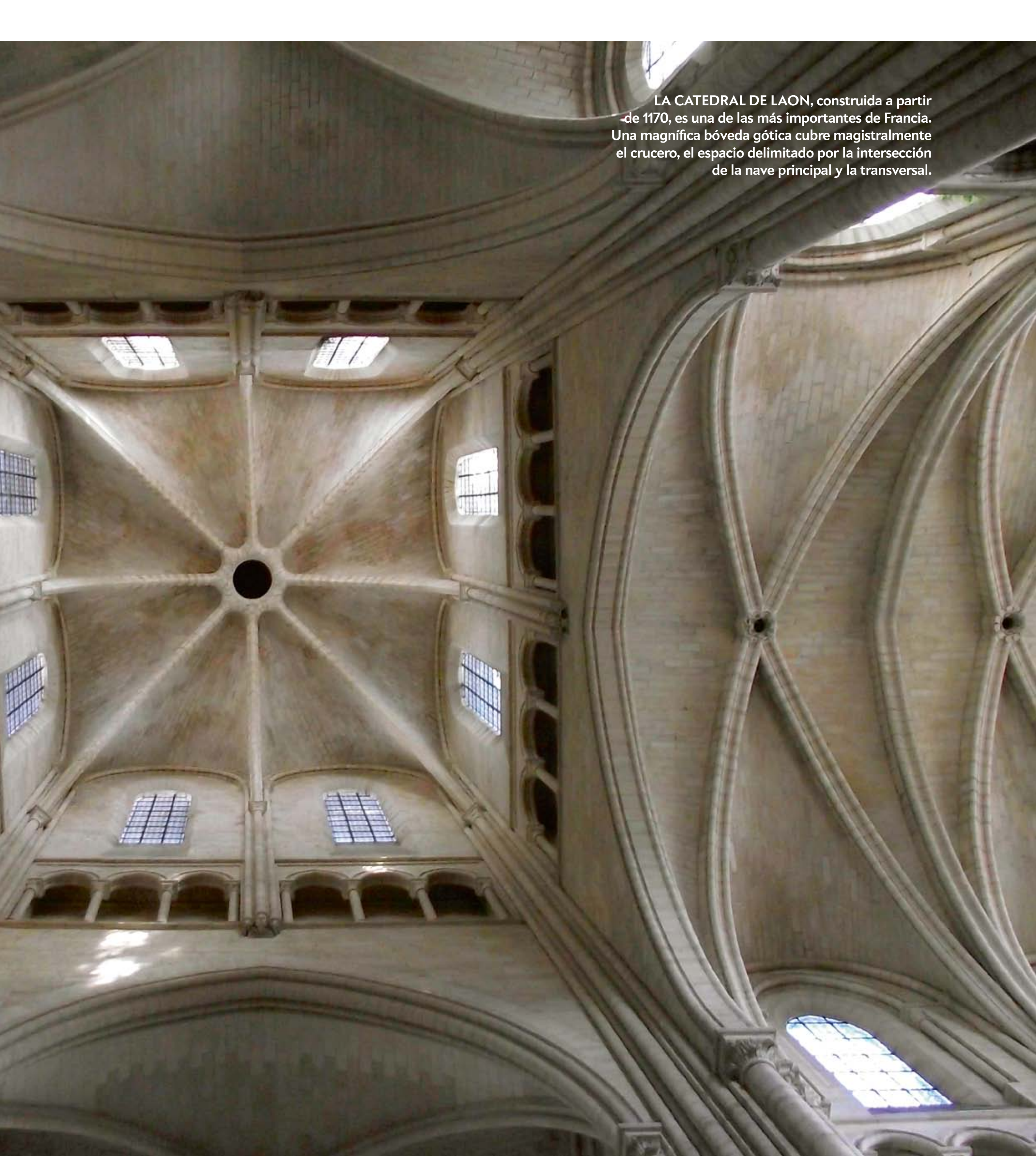
PARTE 1
NALANDA (BUDISMO)
Max Deeg

PARTE 2
GÖBEKLI TEPE (NEOLÍTICO)
Marion Benz

PARTE 3
TÚMULO FUNERARIO DE ANTÍOCO I (HELENISMO)
Jörg Wagner

PARTE 4
CATEDRALES
Matthias Untermann

BOLOS DE PODER



LA CATEDRAL DE LAON, construida a partir de 1170, es una de las más importantes de Francia. Una magnífica bóveda gótica cubre magistralmente el crucero, el espacio delimitado por la intersección de la nave principal y la transversal.

Matthias Untermann es profesor de historia del arte de la Edad Media en la Universidad de Heidelberg. Sus áreas de estudio abarcan la arquitectura religiosa y la arqueología de la Alta y Baja Edad Media. En la actualidad investiga el monasterio cisterciense de Maulbronn y las catedrales de Worms, Maguncia y Magdeburgo.



Allí donde se erigían, las catedrales marcaban de manera muy ostensible la imagen de una ciudad. Tanto sus dimensiones como el trabajo artístico del que hacían gala chocaban con los límites de lo que entonces era posible. Asociaciones de talleres y canteros desarrollaron estructuras organizativas y técnicas totalmente novedosas. Las catedrales sentaron nuevas normas no solo en arquitectura, sino también en la liturgia, puesto que se convirtieron en el escenario de onerosas misas a las que asistían cientos de fieles.

Sin duda, el cambio de las creencias y prácticas cristianas que ha tenido lugar desde la Reforma protestante hasta el siglo xx ha dejado huellas que dificultan reconstruir la imagen original de los monumentos. Pero, en ocasiones, los trabajos de restauración e incluso las excavaciones ofrecen una oportunidad para llevar a cabo estudios detallados.

Hasta hace poco, por ejemplo, nadie podía haber imaginado que en Alemania se conservaba una iglesia episcopal de principios de la Edad Media. En 2013, bajo la iglesia de San Juan, en Maguncia, se descubrieron los muros de una catedral construida entre los años 640 y 680; es decir, aún en época merovingia. El templo mostraba ya elementos característicos de tiempos posteriores, como un coro doble, lo que indicaba que tenía capillas al este y al oeste, así como un transepto de generosas dimensiones. Su función principal debió ser la de servir como alojamiento a los sacerdotes, pues la nave donde se reunía la comunidad ocupaba escasamente un tercio de la superficie total. Probablemente, los feligreses solo acudían a misa en determinados días festivos.

En los últimos años, investigadores de distintas ramas han logrado hallazgos sorprendentes sobre la historia de las catedrales. Entre ellos destaca el hecho de que varias construcciones y técnicas arquitectónicas se erigieron y desarrollaron antes de lo que podemos leer en muchas enciclopedias y libros de texto.

ESPIRITUALIDAD Y POLÍTICA

El término *catedral* deriva del latín *cathedra*, que designaba el sillón en el que se sentaba el obispo en los oficios litúrgicos. Desde los albores de la Edad Media, construir una catedral era el objetivo de todo obispo. Con ello demostraba su propio rango y el de su diócesis, y, al mismo tiempo, cumplía las expectativas que se esperaban de él en cuanto representante de una cierta clase social.

Un ejemplo muy ilustrativo nos lo ofrece la primitiva catedral de Colonia, predecesora de la que conocemos en la actualidad. El arzobispo Hildebold, que vivió hasta el año 818, pertenecía al círculo íntimo de consejeros de Carlomagno, lo que le llevó a acometer una ambiciosa reforma de su iglesia a partir del año 800. El nuevo templo medía sus buenos 95 metros de largo y tenía dos transeptos y dos criptas. Tan solo el arzobispo de Tréveris podía competir con él, al menos en lo referente al tamaño del santuario. Su catedral, de 80 metros de largo, se erigió sobre un edificio del siglo vi.

Tuvieron que pasar cerca de dos siglos para que la antigua catedral de Colonia tuviera competidores. A partir del año 950, el emperador alemán nombraba a los obispos, a los que reconocía también poderes seculares. Como consecuencia, entre los años 980 y 1030 se construyeron iglesias representativas en casi todas las sedes episcopales. No obstante, Colonia siguió siendo la referencia en cuanto a funciones eclesiásticas y posibilidades litúrgicas. En Maguncia, el arzobispo Willigis mandó construir una catedral que medía 60 metros de largo y lucía un conjunto de grandes torres, si bien carecía de altares, el núcleo arquitectónico de la santa misa. Asimismo, es probable que las magníficas bóvedas y los macizos muros de la catedral de Espira, de estilo prerrománico (el aspecto actual data de 1060, época dorada

EN SÍNTESIS

Las catedrales ofrecían a ciudadanos y clérigos una nueva manera de congregarse. También constituían un marco de representación para los obispos y los demás miembros del cabildo catedralicio.

A mediados del siglo xii, antes de lo que se pensó durante mucho tiempo, en Francia comenzó a experimentarse con un nuevo estilo arquitectónico que daría nombre a toda una época: el gótico.

Varios estudios han demostrado que, en el Imperio germano, el nuevo estilo no se impuso hasta decenios más tarde. La estrecha vinculación entre política e Iglesia parece explicar ese retraso.

del románico), impresionaran a los visitantes, pero carecían de relevancia para la liturgia.

De aquellas grandes iglesias episcopales, tan solo la de Verdún, en la región de Lorena y con casi 100 metros de largo, permite apreciar la sencillez del románico temprano, ya que las distintas partes que integran el edificio apenas fueron reformadas con posterioridad. Ventanas enmarcadas por arcos de medio punto dejaban pasar la luz al interior; al mismo tiempo, los arcos de ladrillo distribuían a ambos lados el peso que soportaban. A pesar de contar con numerosos altares, la construcción en sí era muy sobria, con los pilares sin decorar. En un principio los techos no eran abovedados, ya que el modelo en el que se inspiraban estas construcciones eran las basílicas paleocristianas, en cuyas naves se celebraban originariamente mercados y se dirimían litigios judiciales. En general constaban de una nave central más alta y de dos laterales, a las que en la fase inicial del románico se añadió una nave transversal en ángulo recto. El modelo romano conocía ya el ábside; es decir, la parte de planta semicircular que sobresale en la fachada posterior y que, como emplazamiento del coro, se convirtió en un elemento fijo de las iglesias. Allí se situaba —y aún lo hace en la actualidad— el altar mayor. En la Edad Media, el coro estaba reservado a los cantores de los textos litúrgicos. Las torres dobles se convirtieron también en un elemento arquitectónico característico.

En el siglo XI, en pleno apogeo del románico, los progresos técnicos, por un lado, y el creciente bienestar de los príncipes de la Iglesia, por otro, propiciaron la construcción de espléndidos edificios abovedados. En Borgoña, la abadía del monasterio benedictino de Cluny, con cerca de 190 metros de largo, se convirtió en una referencia. Por primera vez se construyó un pasillo que circundaba el coro, al que se adosaron capillas en las que se veneraba a los santos y que le conferían aspecto de corona.



LA CATEDRAL DE VERDÚN, en la región de Lorena, muestra los rasgos típicos del románico temprano (siglos X y XI): arcos de medio punto, pilares sencillos y un techo plano. El altar se ubicaba en el ábside.

CORTESÍA DEL INSTITUTO DE CULTURA DE SARRE (IFLIS). DE: ***DIE KATHEDRALE VON VERDUN***, H. G. MARSCHALL; PÁG. 220, FIG. 63, EN ***VERÖFFENTLICHUNGEN DES INSTITUT FÜR LANDESKUNDE IM SAARLAND***, VOL. 32, 1981.

EL NACIMIENTO DE UN NUEVO ESTILO

Ya en el siglo XII, sin embargo, Francia sentó un nuevo patrón: laboriosos trabajos de cantería comenzaron a adornar las catedrales, cuyos muros, pórticos, pilares y ventanas presentaban múltiples divisiones. Dicho estilo surgió hacia el año 1140 en el contexto de la reforma de parte de la abadía de Saint Denis, cerca de París, y se propagó rápidamente por la región de Isla de Francia, el núcleo del Reino Franco Occidental, situada entre los ríos Sena, Marne, Oise y Beuvrone. En 1163, el obispo de París dispuso que, a partir de ese momento, su catedral se construiría en un nuevo estilo: el gótico. El término, acuñado en Italia en el siglo XVI, significaba originariamente «bárbaro», y con él se pretendía ensalzar al Renacimiento frente a la Edad Media.

Como ocurría en los templos de la Antigüedad, los muros de la nave central se sostenían mediante columnas macizas que, en comparación con los pilares románicos, se caracterizaban por una forma que iba estilizándose desde la base hacia lo alto. En lugar de sencillos capiteles cuadrados, los canteros los decoraban con artísticos follajes. Por su parte, los pilares se hicieron mucho más estilizados; en general eran de forma cilíndrica y estaban rodeados de columnillas que les conferían aspecto de filigrana. Estos soportes enmarcaban galerías y ventanas, soportaban la presión de los nervios de las bóvedas y reforzaban las columnas portantes.

Tales soluciones se remontaban a la Antigüedad clásica. Para los arquitectos del Imperio romano, la abundancia de columnas y las grandes bóvedas eran sinónimo de virtud. Los constructores de la Edad Media también las conocían, como demuestran las crónicas de viajes: para ellos, el Panteón y las termas de Roma eran símbolo de una grandeza del Imperio romano que nunca más volvería a alcanzarse.

Toda esa suntuosidad no aportaba ninguna ventaja directa ni a los creyentes ni a los sacerdotes; lo importante era conseguir una grandiosidad acorde con el Dios supremo. Según recogen las crónicas y las inscripciones, los obispos dejaban claro que semejantes obras eran mérito suyo. Sin embargo, los grandes proyectos góticos eran sustentados y gestionados por el cabildo catedralicio; es decir, por los clérigos que ejercían su ministerio en la catedral. A partir del siglo XII, los miembros del cabildo tenían también influencia política y obtenían pingües ingresos, por lo que cada vez había más nobles que aspiraban al cargo. Gracias a sus buenas relaciones con los poderosos de la época, conseguían recaudar enormes sumas de dinero y obtener la fuerza laboral que exigían proyectos de tal envergadura.

Pero, mientras que los patronos incluían a los clérigos del cabildo en sus alabanzas, no se hacía mención a quienes, en última instancia, eran los responsables del diseño y la construcción de una catedral. Había que elaborar nuevas competencias, y ello solo era posible si se trabajaba en equipo. Hacia el año 1180, los constructores de catedrales franceses introdujeron los dibujos arquitectónicos exactos de gran formato con planta, vistas y secciones —tal y como los siguen utilizando los arquitectos en la actualidad—, lo que les permitió establecer las relaciones entre el interior y el exterior, entre la parte inferior y la superior, y entre la carga y el soporte. A pesar de ello, aquellos visionarios permanecieron en el anonimato.

JUSTIFICAR LA ELEGANCIA

Cada catedral tenía que ser única, por lo que el estilo evolucionaba constantemente. De las grandes ventanas acabadas en arco de medio punto del románico, en Saint Denis se desarrolló la forma ojival típica del arte gótico, y los vanos correspondientes se subdividieron mediante tracerías de piedra de motivos circulares. Las columnas cilíndricas u octogonales y las semicolumnillas conferían al soporte el aspecto de un haz de cilindros. Mientras que en las catedrales románicas los contrafuertes del exterior transmitían al suelo la carga de varias toneladas, en los templos góticos se utilizaron para ello arbotantes cada vez más esbeltos y afiligranados.

Algunas innovaciones no resultan tan evidentes. Por ejemplo, a diferencia de lo que era habitual en otras épocas, ya no se aprovechaban los cimientos de edificios anteriores, sino que se construían otros nuevos. En general se trataba de cimentaciones puntuales; es decir, se excavaban fosas profundas, las cuales se rellenaban con mampostería a base de piedras y mortero. Vigas de madera y barras de hierro distribuían las fuerzas que se generaban en el edificio, de forma similar a como lo hacen hoy en día las mallas de acero en el hormigón armado. Sin estas innovaciones, los templos habrían sido mucho más pequeños y de aspecto más robusto. A ellas se sumó una nueva preparación de los materiales, sobre todo en lo que se refiere a los sillares, lo que consiguió acortar el tiempo de construcción.

Semejantes proyectos eran de tal envergadura que necesitaban una justificación. Los cronistas destacaban sus ventajas; entre ellas, la posibilidad de que un número mayor de fieles acudiera a misa. Sin embargo, y salvo excepciones, las catedrales góticas no ofrecían mucho más espacio que sus antecesoras románicas, y ello a pesar de que la población de las sedes episcopales experimentó un fuerte crecimiento durante esa época. Los cronistas mencionan también incendios en los templos primitivos que, probablemente, habrían exigido la construcción de una nueva iglesia o, al menos, un saneamiento de las partes que hubieran sobrevivido a las llamas. Los historiadores del arte han usado estos datos para fechar las catedrales: la ciudad de Chartres sufrió un incendio devastador en 1194, y Reims fue parcialmente pasto de las llamas en 1211.

Desde hace unos años, sin embargo, numerosos investigadores han calificado de mito ese supuesto vínculo transmitido por la tradición entre el fuego y la construcción de una catedral. En el tejado de la nave principal de la catedral gótica de Chartres se han encontrado vigas que el análisis dendrocronológico permite datar hacia el año 1200; por su parte, el coro estaba terminado en 1210. Es imposible que en los pocos años transcurridos desde el incendio de 1194 pudieran terminarse dichos elementos. En realidad, la catedral empezó a construirse en 1140 y los trabajos progresaron a su ritmo, y el incendio de la ciudad se usó posteriormente como justificación. Algo similar puede decirse de Reims: algunas de las vigas de madera situadas sobre los capiteles de las columnas se instalaron poco después de 1212; cuando se produjo el incendio, hacía ya tiempo que el templo estaba en servicio.

Varias pruebas científicas sugieren un comienzo de la construcción hacia mediados del siglo xii. Eso sitúa ambos monumentos en otro contexto social. En aquella época, teólogos y filósofos comenzaron a observar la naturaleza con otros ojos. A fin de descubrir la obra de Dios en los animales y las plantas, recurrieron a la razón humana. Por primera vez desde la Antigüedad, los eruditos valoraron la experiencia, la evaluación y los argumentos racionales más que los principios de la fe. Las formas geométricamente diferenciadas de los pilares, tracerías y rosetones reflejaban las nuevas estructuras de pensamiento de la teología y la jurisprudencia. Del mismo modo, las numerosas esculturas, que hoy nos llaman la atención por modernas, representaban una nueva mirada sobre el ser humano. Los escultores de Reims sentaron las bases de ello al dotar a sus obras de una mímica que intentaba reproducir las emociones y los afectos humanos. Al respecto, resulta difícil pensar que los artistas no se inspiraran en las antiguas máscaras de teatro que se conocían de las ruinas.

EL ESTANCAMIENTO ALEMÁN

Durante muchas décadas, tan solo los obispos franceses e ingleses o, en su caso, los proveedores de fondos se sintieron atraídos por el estilo gótico, lo que no deja de causar sorpresa. La catedral de Wurzburgo, por ejemplo, cuyas obras comenzaron en 1150-60, se construyó enteramente en la tradición del siglo xi, y en numerosos lugares las catedrales de la época carolingia ni siquiera se renovaron. En el caso concreto del Imperio germano, una posible explicación podría buscarse en el esfuerzo de los príncipes de la Iglesia por poner de manifiesto su rango recurriendo a la antigüedad de su obispado; en este sentido, la modernidad habría resultado contraproducente.



EN LAS CATEDRALES GÓTICAS, los canteros decoraban las ventanas con rosetones y arcos circulares. Las columnas que soportaban la carga se reforzaban con otras columnillas más delgadas. Esta fotografía muestra el Coro de los Ángeles de la catedral de Lincoln, en Inglaterra, construido entre 1256 y 1320.

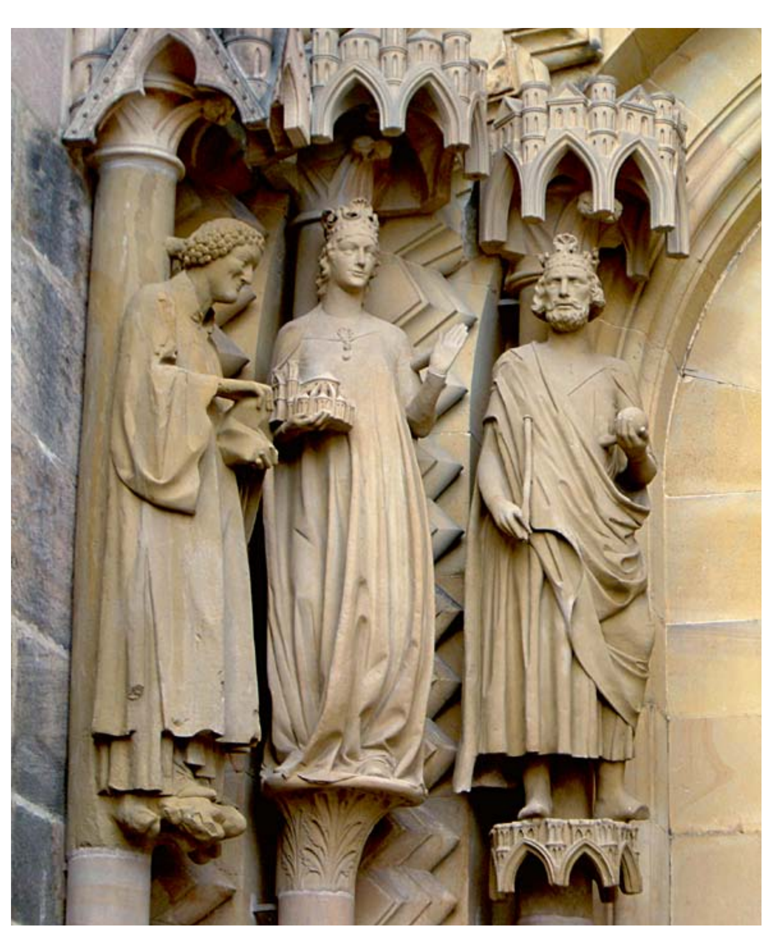
Los canteros alemanes, como se denomina en general a los distintos artesanos que participaban en la construcción, conocían sin embargo las innovaciones francesas. Así al menos se desprende de algunos detalles de su trabajo: por ejemplo, a la vez que se acometían las obras de la catedral de Wurzburgo, el ábside de la iglesia del monasterio de San Martín, en Colonia, mostraba columnas inusitadamente delgadas para el arte románico.

A finales del siglo XII, el conflicto entre la tradición por la que abogaban los patriarcas y la innovación defendida por los constructores desembocó en una ruptura de estilos. El coro occidental de la catedral de Worms, que se empezó a construir en 1170 y fue consagrada en 1181, se decoró tanto interior como exteriormente con gran profusión de arcos, frisos y perfiles; es decir, con motivos ornamentales románicos. Sin embargo, en las paredes se abren ventanas en forma de rosetones, los cuales se hallan dispuestos de tal manera que recuerdan a las primitivas ventanas góticas de tracería. El rosetón central rompe incluso la división de la pared: es tan ancho que expulsa hacia el exterior las columnillas que deberían soportar los nervios de la bóveda. Ello impedía que pudieran ascender en línea recta, lo que perjudicaba su función. Resulta muy difícil pensar que su responsable, el obispo Conrado II, deseara semejante disposición. En la reforma del templo que se acometió en el siglo XVIII se subsanó ese supuesto error arquitectónico, si bien en la restauración de 1900 se recuperó el diseño original.

Ese conflicto estilístico se refleja también en la nueva catedral de Bamberg, de unos 100 metros de largo. Esta se comenzó a construir en 1170 al este de la antigua iglesia —que, por el momento, continuó usándose— con dos torres, una cripta y un gran ábside con formas románicas. Sin embargo, la estructura del muro del presbiterio oriental, que según las fuentes fue terminado como muy tarde en 1201, no es homogénea. En ocasiones parece como si el constructor hubiera tenido en mente una bóveda de seis partes y, en otras, la tradicional de cuatro partes. Hacia 1215, el cabildo de la catedral de Bamberg contrató a escultores para decorar el portal norte, quienes se inspiraron en la ornamentación de la catedral de Reims. Durante largo tiempo, este dato confundió a los historiadores del arte, pues, según la crónica del incendio, la construcción de esta última se había iniciado en 1211. Sin embargo, hoy sabemos que ambos templos se construyeron a la vez. El escultor que realizó una de las estatuas de la reina Cunegunda —venerada junto con su esposo, Enrique II, como la fundadora del obispado— la representó como donante sosteniendo en la mano una iglesia en miniatura, tal como era habitual en la época. En general, la maqueta reproducía el templo en construcción. En este caso, se trata de un coro con girola según el modelo gótico.

Los detalles arquitectónicos y la decoración escultórica confirman así que tanto los constructores como los escultores conocían perfectamente lo que ocurría en Francia. La rivalidad entre el rey galo y el emperador alemán impedía, sin embargo, que los obispos germanos adoptasen sin más elementos foráneos, pues ello podría haberse interpretado como partidismo. A pesar de todo, en algunos detalles de importancia menor aceptaron actualizar las formas arquitectónicas tradicionales. Cuando en 1200 se inició la construcción del monasterio cisterciense de Ebrach, situado entre Bamberg y Wurzburgo, se contrató a canteros de Borgoña. En el contexto alemán, los arcos ojivales, la abundancia de columnas y otros elementos eran algo totalmente nuevo. En Francia, en cambio, ya se habían quedado anticuados.

En 1220, operarios de Ebrach se trasladaron a Bamberg, donde construyeron el lado occidental de la catedral en analogía con el gótico cisterciense temprano. En cierto modo, las torres occidentales se inspiraron en el modelo francés: sobre los pisos inferiores románicos se levantaron otros superiores, cuyas divisiones y subdivisiones evocan las torres de la fachada occidental de la catedral de Laon, al norte de París, ya famosas en aquel tiempo. Incluso los bueyes que en Laon miran desde el «bosque de columnas» de los torreones de las esquinas se reprodujeron en Bamberg. El hecho de que la copia se parezca tanto al original demuestra precisamente que, a diferencia de lo que sucedió en los portales, en las torres no trabajaron canteros formados en Francia. Laon se construyó en 1170 y, en los 50 años precedentes, el estilo de Chartres y Reims se había simplificado en aras de una mayor elegancia.



DURANTE LARGO TIEMPO, en el Imperio germano el estilo gótico se limitó a algunos detalles. Así ocurre en la catedral de Bamberg, donde la estatua de la reina Cunegunda sostiene en la mano la maqueta de un coro gótico.

EL FIN DE UNA ERA

La primera iglesia puramente gótica erigida en la frontera con Francia fue la catedral de Toul, un pequeño obispado de Lorena que en la Edad Media pertenecía al Imperio germano. Las obras comenzaron en 1207 y se orientaron claramente hacia las innovaciones de Reims. Sin embargo, no se terminaron hasta 1275, pues el obispado se quedó sin fondos.

De ello se aprovechó su homólogo de Tréveris, donde se encontró una vía para conjugar tradición y modernidad. La iglesia formaba parte de un «conjunto catedralicio» que comprendía un claustro, capillas e iglesias contiguas, a las que pertenecía la

iglesia de Nuestra Señora. En 1220-30, el cabildo catedralicio acordó levantar una nueva edificación. Es muy probable que, dado que no se trataba de la iglesia principal desde el punto de vista de la representación episcopal, ni tampoco contribuía especialmente a reafirmar el estatus de la diócesis más antigua de Alemania, los constructores se atrevieran a plasmar en ella formas góticas modernas. Para ello llamaron a canteros de Toul, donde entretanto las obras se habían paralizado. Gracias a la conservación de algunos planos, hoy los expertos están seguros de que el proyecto se llevó a cabo sin apenas modificaciones.

También en Colonia estaba prevista la construcción de una nueva catedral, pero una disputa sucesoria bloqueó el proyecto. A la muerte de Enrique VI, en 1197, el trono alemán quedó vacante, pues su presunto sucesor, Federico II, era menor de edad. Hasta que el aspirante pudiera asumir la corona, dos príncipes rivales eligieron a regentes distintos. En la lucha por el trono, los arzobispos de Colonia apoyaron a uno de los bandos y fueron denunciados, destituidos o excomulgados. En 1225, Engelberto I fue asesinado. Este príncipe había ordenado al cabildo catedralicio la construcción de una nueva catedral —el núcleo de la iglesia existente se remontaba al siglo IX—, pero el clero se negó a ello y hasta 1248 no se puso en marcha el proyecto. Por otra parte, casi al comienzo de los trabajos de demolición se desató un incendio incontrolado. La antigua catedral sucumbió a las llamas y se reconstruyó con carácter provisional, lo que aceleró la construcción de una nueva. Ya en 1270, los maestros de obra presentaron el boceto de la doble fachada (que, sin embargo, no se terminaría hasta 1881). La sillería del coro se instaló en 1311, y en 1322 pudo celebrarse la solemne consagración del coro.

El modelo para la nueva catedral de Colonia fue la de Amiens, la más moderna de Francia en aquella época. Tras los vaivenes políticos de la lucha por el trono, los conceptos tradicionales relativos a la representación de los príncipes de la Iglesia perdieron importancia: se deseaba un nuevo comienzo. El cabildo catedralicio apoyaba la modernidad estética, demostrando con ello su rango e independencia. Los miembros que lo integraban decidieron pasar a la posteridad: en el nuevo coro, las estatuas de los doce apóstoles representaban el modelo bíblico de cada uno de los cabildos, y las vidrieras situadas encima de ellas mostraban a 51 reyes del Antiguo Testamento, el número de canónigos de Colonia.

Los obispos estaban sin duda en el punto de mira de los maestros canteros. Empezando por Maternus, primer obispo de Colonia, aparecen representados a un lado de la cancela sobre la sillería del coro, terminada en 1311. Al otro lado destacan los reyes y emperadores germanos encabezados por Julio César, como correspondía a la identidad de la otrora metrópoli romana. Las tumbas de los arzobispos de la catedral antigua se trasladaron a las capillas del deambulatorio, donde se reacondicionaron; en particular la de Konrad von Hochstaden, quien puso la primera piedra en 1248.

Ciertamente, la catedral pretendía ser también una iglesia para los habitantes de Colonia y los fieles de todo el distrito arzobispal. Sin embargo, el espacio resultó por entonces insuficiente, pues a raíz de la consagración del coro, en 1322, se interrumpieron las obras de construcción del transepto y la nave principal. La grúa que hasta 1868 sobresaldría por encima de la inacabada catedral se convirtió no solo en símbolo de la arrogancia humana, sino también en objeto de reproches religiosos. Los ciudadanos se enfrentaron al arzobispado. En la guerra de sucesión de Limburgo de 1288 habían apoyado a los adversarios del príncipe de la Iglesia, al que expulsaron de la ciudad. Como consecuencia, el obispo de Colonia perdió gran parte de su poder. Estos acontecimientos fueron sintomáticos: la era de las catedrales como grandes proyectos arquitectónicos para la gloria de Dios había quedado atrás. IyC



DIECISÉIS BUEYES se asoman al exterior entre las columnas del piso superior de la catedral de Laon. Algunos expertos ven en ellos una alusión a la decoración escultórica del templo de Salomón.

PARA SABER MÁS

Die gotische Architektur in Frankreich 1130-1270. Dieter Kimpel y Robert Suckale. Hirmer, 1985.
Das gotische Gewölbe: Eine Geschichte seiner Form und Konstruktion. Norbert Nußbaum y Sabine Lepsky. Deutsche Kunstverlag, 1999.
Handbuch der mittelalterlichen Architektur. Matthias Untermann. Theiss, 2009.
Die Baukonstruktion gotischer Fenstermasswerke in Mitteleuropa. Christian Kayser. Imhof, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Experimentos sobre estructuras góticas. Robert Mark y William W. Clark en *IyC*, enero de 1985.
La obra de la catedral de Florencia. Gustina Scaglia en *IyC*, marzo de 1991.



ARGO: conocer

Tras casi dos décadas de implantación y desarrollo, un gran proyecto internacional ha llevado el océano al primer plano de la investigación climática

Alberto González Santana y Pedro Vélez Belchí

el océano global

El océano constituye una pieza clave del sistema climático. Junto con la atmósfera, se encarga de repartir por todo el planeta el calor que llega a las regiones tropicales y ecuatoriales, mucho mayor que el que alcanza los polos debido al ángulo de incidencia de los rayos del Sol. A partir del trópico de Cáncer, por ejemplo, el mar transporta energía hacia el norte a un ritmo de unos dos petavatios: una potencia equivalente a la que generarían dos millones de centrales térmicas de gran tamaño.

El estudio del océano resulta por tanto crucial para entender la variabilidad del sistema climático y predecir su comportamiento. Con esta idea en mente, a finales del siglo pasado tuvo lugar uno los principales hitos de la oceanografía moderna: la concepción del programa Argo. Hoy, este proyecto internacional de observación del océano cuenta con unas 4000 boyas distribuidas por todo el mundo que, en tiempo casi real, recaban datos sobre la presión, salinidad y temperatura de las corrientes marinas en los primeros 2000 metros de profundidad. En menos de 24 horas, todos los datos medidos por la red global Argo están disponibles de manera gratuita para todo el público.

Tras más de quince años desde su implantación, el programa internacional Argo ha alcanzado su estado de madurez. Sus datos nos ofrecen una descripción cuantitativa de las estructuras oceanográficas, su variabilidad en escalas de meses a décadas y su capacidad para acumular y transportar calor y sal. Todo ello nos está permitiendo entender por primera vez la naturaleza cambiante del océano.

Ahora la red se enfrenta al reto de permanecer activa en los años venideros. A tal fin se ha diseñado su evolución futura con diferentes objetivos, entre los que se incluyen la exploración del océano profundo por debajo de los 2000 metros actuales, así como mejorar la cobertura de la red en las zonas más turbulentas. Asimismo, otras metas contemplan abordar medidas no solo de temperatura y salinidad, sino también de parámetros biogeoquímicos, como la concentración de oxígeno disuelto, nutrientes y clorofila, necesarios para entender el gran ecosistema que es el océano. Tales innovaciones prometen cambiar para siempre la oceanografía y ayudarnos a entender mejor la dinámica de nuestro planeta en un contexto de cambio global.

UN PROTAGONISTA DESCONOCIDO

Durante los años sesenta del siglo pasado, los científicos comenzaron a darse cuenta de que el océano desempeñaba un papel primordial en la predicción del clima, ya que su actividad iba más allá de las capas marinas superficiales. Sin embargo, su dinámica a gran escala resultaba en gran parte desconocida. Para cubrir ese hueco, diversas instituciones internacionales crearon en 1980 el Programa Mundial de Investigación Climática (WCRP, por sus siglas en inglés), el cual otorgaba un notable protagonismo a la circulación oceánica a escala global.

En ese marco nació uno de los proyectos más ambiciosos de la oceanografía: el Experimento Mundial de Circulación Oceánica (WOCE). Este supuso un cambio definitivo en la forma de investigar los océanos, ya que por vez primera se pasó de una perspectiva local a una global. Entre 1990 y 1998, más de 40 países, entre ellos España, comenzaron a efectuar observaciones del mar tanto in situ como por satélite. Ello permitió obtener la primera imagen del océano a escala planetaria.

Para afrontar el reto que suponía el WOCE, los investigadores del Instituto Scripps de Oceanografía de la Universidad de California desarrollaron un tipo de boya autónoma capaz de ir a la deriva con las corrientes marinas a 1000 metros de profundidad. Más tarde, los avances técnicos permitieron incorporar a dichos dispositivos sensores de temperatura y salinidad. Fue así como en 1998 se concibió el programa Argo: una red global de boyas que, por primera vez, podría realizar un seguimiento ininterrumpido de las corrientes marinas de todo el mundo en los primeros 2000 metros de profundidad. En un principio, el nombre Argo surgió como acrónimo de Red de Oceanografía Geostrófica en Tiempo Real (Array for Real-time Geostrophic

Oceanography). Hoy, sin embargo, hace referencia a los argonautas de la mitología griega: el barco en el que viajaba Jasón para capturar el vellocino de oro se denominaba *Argo*, y este es también el sobrenombre de la misión por satélite que monitoriza el nivel del mar, complementando así a la propia red Argo.

Las boyas de Argo se distribuyen por todos los océanos y mares del mundo aproximadamente cada 3 grados de latitud y longitud. A fecha de marzo de 2018, su número ascendía a 3784. Cada una de ellas mide 1,80 metros de altura y 25 centímetros de diámetro. No necesitan sistema de propulsión: además de avanzar horizontalmente dejándose llevar por las corrientes marinas, pueden subir y bajar cambiando su flotabilidad a lo largo de la columna de agua. Cada boya opera en ciclos de 10 días. Primero desciende desde la superficie hasta la profundidad inicial deseada, habitualmente unos 1000 metros, en la que permanece derivando durante unos 9 días. Después se sumerge hasta los 2000 metros y comienza de forma automática su ascenso hasta la superficie. Durante este trayecto, toma medidas de la temperatura y la salinidad que, más tarde, serán transmitidas desde la superficie vía satélite a las estaciones receptoras, lo cual cierra el ciclo. Cada uno de los conjuntos de datos de temperatura y salinidad medidos desde los 2000 metros hasta la superficie se denomina «perfil oceanográfico». Con una precisión de 0,005 grados en las mediciones de temperatura y de 0,01 unidades en las de salinidad (una «unidad práctica de salinidad» se define como 1 gramo de sal por 1000 de agua), Argo ofrece una descripción extraordinariamente detallada de las estructuras oceanográficas y de sus variaciones, en escalas temporales que van de meses a décadas.

Asociado a la red Argo existe un conjunto de mecanismos, comités y centros virtuales que se encargan de todas las tareas relativas a los datos, desde el momento de su adquisición vía satélite hasta su publicación en menos de 24 horas en Internet y en la red global de telecomunicaciones. Cabe destacar que todos los datos son de carácter público y gratuito. Todo ello está suponiendo una verdadera revolución en el estudio del océano: no en vano, la red aporta datos a un ritmo veinte veces mayor que los métodos tradicionales a bordo de buques oceanográficos. El programa Argo ha supuesto también una revolución en materia de cooperación internacional. Aunque el proyecto está avalado por la Comisión Oceanográfica Intergubernamental y por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, cada país que financia la red lo hace de manera voluntaria y comparte gratuitamente todos los datos obtenidos. De igual modo, los comités y grupos de trabajo que aseguran la calidad y el funcionamiento de la red también operan y se sufragan sin necesidad de que exista un organismo supranacional que regule su labor.

EL OCÉANO Y EL CLIMA

Desde 1999, la red Argo ha realizado más de 1,5 millones de perfiles oceanográficos, el triple de todos los efectuados desde los inicios de la oceanografía a comienzos del siglo xx. A modo de comparativa, durante el experimento WOCE se llevaron a cabo unos 8000. Además, la red estudia el océano de manera homogénea, a diferencia de las observaciones desde buques oceanográficos, las cuales tienen lugar principalmente en el hemisferio norte y durante el verano. Ello ha posibilitado la consecución de todo tipo de objetivos, desde un mejor conocimiento del estado actual del océano hasta el análisis de su variabilidad espaciotemporal y su papel en el clima terrestre. Todos estos avances se han plasmado en más de 2100 artículos científicos que reflejan el uso de los datos procedentes de Argo.

Uno de los aspectos principales del programa Argo es que, por primera vez, ha posibilitado registrar con gran detalle la estructura global de los campos de salinidad y temperatura. Estas dos variables revisten gran importancia en oceanografía, ya que, entre otras razones, gracias a ellas puede obtenerse una buena aproximación de las corrientes marinas. Medir las corrientes por medios directos suele ser difícil y costoso, dada la hostilidad del entorno a los métodos mecánicos y las limitaciones inherentes a otras técnicas, como las acústicas. Sin embargo, una herramienta matemática conocida como «teoría geostrófica» permite obtener una estimación muy fiable de las corrientes oceánicas a partir del efecto de rotación de la Tierra (la fuerza de Coriolis) y el perfil vertical de la densidad del agua. Y, a su vez, la densidad depende esencialmente de la temperatura y la salinidad: dos variables mucho más sencillas y económicas de medir.

El programa Argo ha brindado una ayuda inestimable a la hora de entender el papel del océano en el clima global. En 2015, Dean Roemmich, del Instituto Scripps, y sus colaboradores encontraron que el calentamiento de los 1000 metros más superficiales del océano había sido de 0,3 grados Celsius en promedio en los últimos 135 años, con un máximo de 0,6 grados cerca de la superficie. En este sentido, los datos de Argo han revelado que la mayor parte de la superficie marina se halla más caliente ahora que en décadas previas, con un aumento global promedio de 0,2 grados desde mediados del siglo xx. Existen además zonas con calentamientos y enfriamientos extremos, de hasta 1 grado Celsius con respecto a decenios anteriores. En la era Argo se ha registrado un incremento en la temperatura media promedio

Alberto González Santana es técnico superior especialista de la red Argo España. Investiga en el Centro Oceanográfico de Canarias del Instituto Español de Oceanografía (IEO).

Pedro Vélez Belchí, miembro del Centro Oceanográfico de Canarias del IEO, es investigador principal y coordinador de la contribución española al programa internacional Argo.

EN SÍNTESIS

A pesar de su importancia en el sistema climático terrestre, la dinámica global de los océanos ha sido hasta hace poco una gran desconocida. Para llenar ese hueco, hace unos años se puso en marcha el programa internacional Argo.

La red Argo consta de miles de boyas repartidas por todos los océanos del mundo que monitorizan la temperatura y la salinidad del agua en tiempo casi real. Esos datos han permitido analizar las corrientes marinas con enorme resolución.

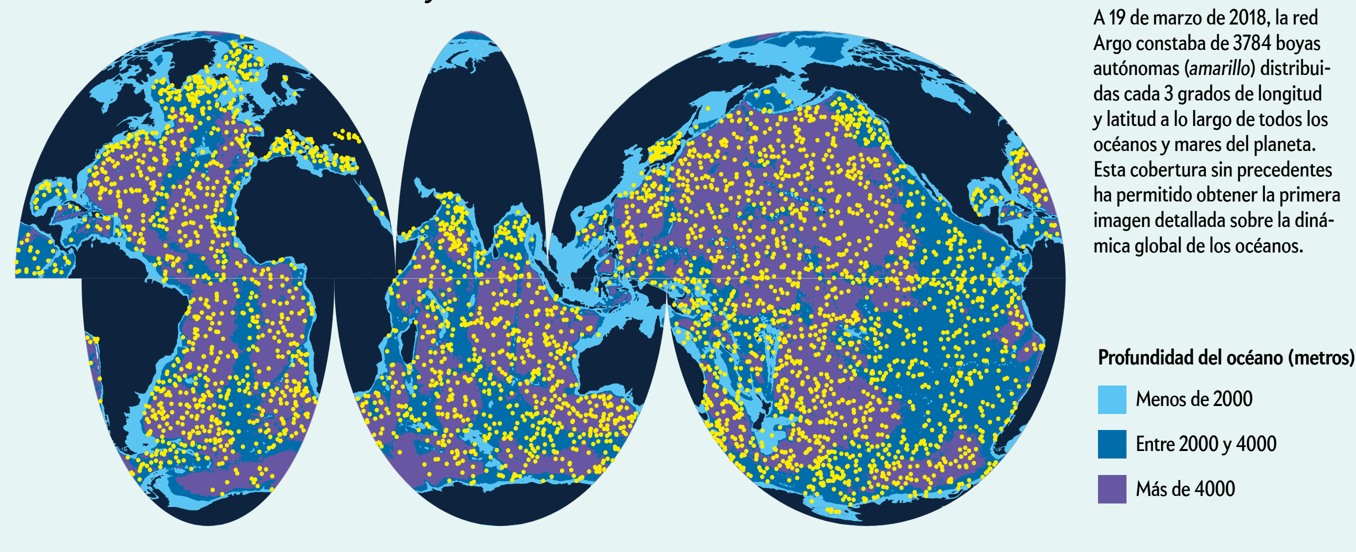
El futuro del programa se enfrenta ahora a varios desafíos. Entre ellos, mejorar la cobertura en las zonas más turbulentas, analizar el océano profundo y ampliar la toma de datos a parámetros biogeoquímicos.

Un enjambre de boyas para sondear el océano global

Al contrario de lo que ocurre con la atmósfera, los detalles de la dinámica global del océano eran en buena parte desconocidos hasta hace relativamente poco. Para cubrir ese hueco se concibió a finales de los años noventa el proyecto Argo: un gran programa internacional para monitorizar, prácticamente en tiempo real, la salinidad y la temperatura a lo largo de todos los océanos y mares del planeta.

La red Argo consta de más de 3700 boyas distribuidas por todas las cuencas oceánicas (*arriba*). Estos dispositivos han sido diseñados para medir con un alto grado de precisión la temperatura y la salinidad hasta una profundidad de 2000 metros. En ciclos de unos 10 días, cada uno de ellos se sumerge, recorre varios kilómetros a la deriva y emerge de nuevo para enviar por satélite los resultados de sus mediciones (*abajo*).

Más de 3700 boyas destinadas a la observación oceánica



A 19 de marzo de 2018, la red Argo constaba de 3784 boyas autónomas (*amarillo*) distribuidas cada 3 grados de longitud y latitud a lo largo de todos los océanos y mares del planeta. Esta cobertura sin precedentes ha permitido obtener la primera imagen detallada sobre la dinámica global de los océanos.

Comienzo del ciclo

Transmisión de datos vía satélite

Descenso inicial hasta la profundidad deseada

Deriva a unos 1000 metros de profundidad (9 días)

Toma de datos de temperatura y salinidad durante el ascenso

Descenso a unos 2000 metros de profundidad

Las boyas de Argo miden 1,80 metros de altura y 25 centímetros de diámetro. Cada una efectúa de forma cíclica desplazamientos verticales desde la superficie hasta una profundidad de unos 1000 metros, donde permanecen a la deriva durante 9 días. Después, se sumergen hasta los 2000 metros de profundidad y comienzan su ascenso hasta la superficie, tomando en el camino medidas muy precisas de la temperatura y la salinidad del agua. Por último, los datos se transmiten vía satélite a la superficie y el ciclo comienza de nuevo.

ARGO ESPAÑA (*mapa de boyas*); OFICINA DE COORDINACIÓN CIENTÍFICA DE ARGO, INSTITUTO SCRIPPS DE OCEANOGRAFÍA (*ciclo de operación*)

desde 2012, asociado principalmente a un calentamiento en los 200 metros más superficiales, así como en las capas profundas por debajo de los 800 metros.

Argo ha posibilitado entender este aumento de temperatura en términos de la cantidad de calor almacenada en el océano. Considerando datos hidrográficos previos y los procedentes de Argo, se ha observado que en los últimos 40 años ha aumentado el contenido de calor acumulado en los primeros 700 metros de profundidad, un incremento que supone más del 90 por ciento del exceso de calor del sistema climático almacenado en los océanos. En la última década, la mayor parte de ese aumento se ha producido en el océano Antártico, pobremente muestreado antes del comienzo del programa Argo. En general, durante la era Argo se ha comprobado que el océano se está calentando, sobre todo entre los 20 grados de latitud sur y la Antártida.

A lo largo de la historia, la salinidad se ha registrado en menor medida a pesar de su relevancia, ya que en superficie constituye un indicativo del ciclo hidrológico. Tradicionalmente, esa falta de datos obedecía a las dificultades para medirla. Las boyas de Argo solucionan el problema efectuando mediciones de la conductividad eléctrica del agua, la cual permite inferir la cantidad de sal disuelta en ella. Gracias a estos datos, Shigeki Hosoda, de la Agencia Japonesa para la Tecnología Marina y Terrestre, y sus colaboradores identificaron en 2009 un patrón de cambio de salinidad en la parte superior de los océanos en cada una de las principales cuencas, el cual parece ser compa-

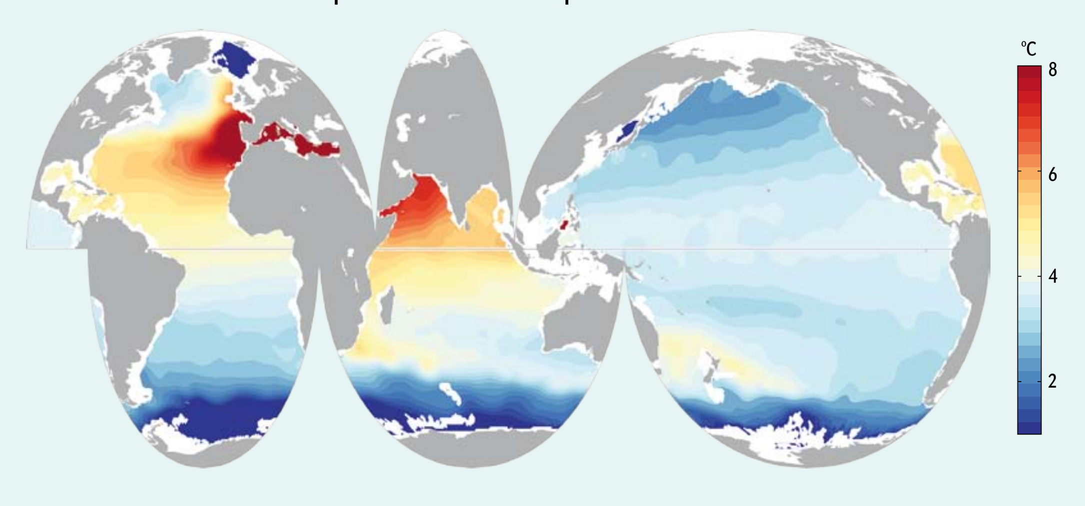
RESOLUCIÓN ESPACIAL

Temperatura y salinidad

Las boyas de Argo se encargan de obtener perfiles de salinidad y temperatura en función de la profundiad. Estos dos parámetros son fundamentales en oceanografía, ya que, entre otras razones, permiten obtener una estimación muy fiable de las corrientes marinas, las cuales resultan difíciles de medir por medios directos. Ello es posible gracias a una herramienta matemática conocida como «teoría geostrófica», una aproximación de las ecuaciones que rigen el movimiento del océano.

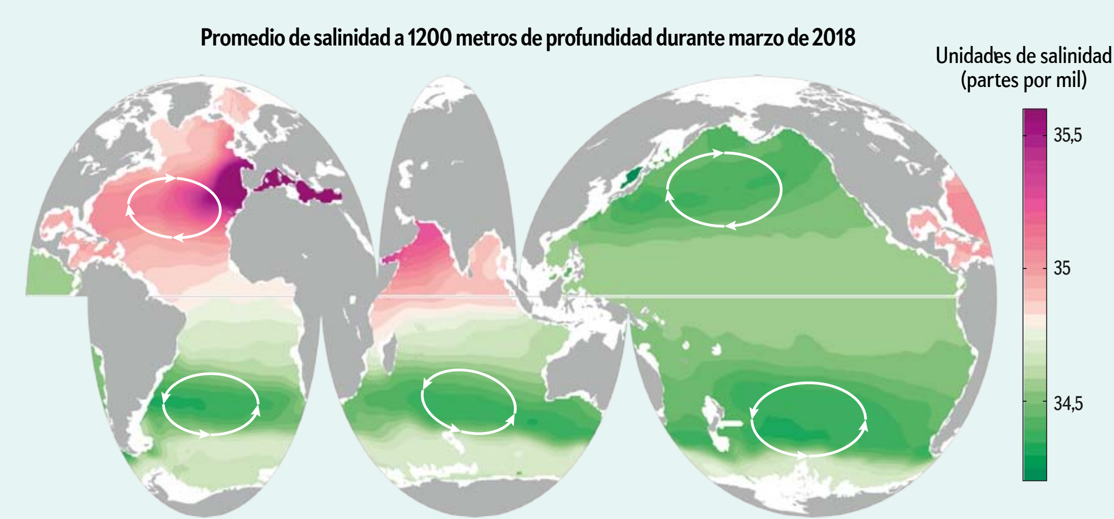
La red Argo ha permitido registrar con gran detalle la estructura global de los campos de salinidad y temperatura de los océanos hasta los 2000 metros, de forma tanto local como global. Dos imágenes impensables hasta hace muy poco son las que se reproducen aquí. En ellas se muestra la distribución de temperatura (*arriba*) y salinidad (*abajo*) a 1200 metros de profundidad durante marzo de 2018, a partir de los datos de casi 11.700 perfiles obtenidos por Argo a lo largo de dicho mes.

Promedio de temperatura a 1200 metros de profundidad durante marzo de 2018



En este mapa global de temperaturas pueden apreciarse con claridad varios fenómenos llamativos. Uno de ellos es el enorme impacto del agua caliente procedente del Mediterráneo, cuya presencia prácticamente llega a las costas de Norteamérica. También se observan los meandros de la corriente circumpolar Antártica, que discurren entre todos los continentes y la Antártida, e incluso los meandros profundos de la corriente de Kuroshio, al este de Japón. Estos últimos transportan calor desde los trópicos hasta el Pacífico Norte.

Promedio de salinidad a 1200 metros de profundidad durante marzo de 2018



Los datos de salinidad revelan algunas estructuras similares a las observadas en los mapas de temperatura. Por lo que se refiere a otros aspectos de interés, esta imagen muestra los centros de los giros subtropicales (corrientes rotatorias, *flechas*), caracterizados por un mínimo relativo de salinidad en todas las cuencas oceánicas.

ARGO ESPAÑA, CON DATOS DE LA RED ARGO DE MARZO DE 2018 (*datos de temperatura y salinidad*)

tible con un calentamiento general de las capas superficiales. En las latitudes medias, el calentamiento superficial se ve acompañado de una mayor evaporación, lo que eleva la salinidad de las aguas menos profundas. Los datos Argo muestran además que el contraste en la salinidad superficial está aumentando, con zonas ya saladas que ganan más sal y regiones poco salinas que pasan a serlo aún menos. Esta situación concuerda con los cambios en el ciclo hidrológico global y con un aumento del transporte del vapor de agua a través de la atmósfera.

Por último, los datos también están permitiendo examinar la variabilidad en el proceso conocido como «ventilación del océano profundo», un fenómeno de gran importancia en el desplazamiento de calor y gases desde la superficie marina hacia las capas más profundas. Dado que las corrientes oceánicas son predominantemente horizontales, las capas profundas se encuentran aisladas de la superficie. Sin embargo, en algunas regiones de latitudes altas del Atlántico Norte y el océano Antártico, la interacción de la atmósfera con las aguas superficiales provoca que estas últimas aumenten su densidad y se hundan. Los datos de la red Argo han revelado desde 2008 cómo se produce este fenómeno, así como su relación con las condiciones atmosféricas.

SUPERAR LAS DIFICULTADES

Detrás de cada logro existen desafíos, y el caso del proyecto Argo no iba a ser menos. A lo largo de su trayectoria han surgido obstáculos de distinta índole, desde los puramente tecnológicos hasta otros relacionados con cuestiones de cooperación internacional.

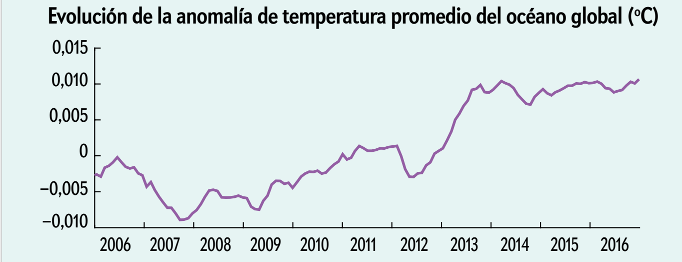
Desde el punto de vista técnico, a diferencia de los instrumentos usados de manera habitual en oceanografía, las boyas de Argo se hallan a la deriva durante un período de más de tres años, lo que impide subsanar de manera inmediata los problemas que puedan sufrir. De hecho, durante las primeras fases de implementación de la red, el tipo de sensor empleado para medir la presión tuvo que reemplazarse debido a su falta de estabilidad. En general, conocer la presión que soporta la boya permite determinar la profundidad a la que se efectúan las mediciones de temperatura y salinidad. En el caso de un modelo particular de sensor, sin embargo, sus versiones iniciales reportaban medidas de presión erróneas una vez la boya alcanzaba la superficie, lo que obligó a descartar cierta cantidad de datos. Con todo, dichos problemas pudieron solventarse gracias a un proceso adecuado de análisis y tratamiento de datos por parte de todos los equipos científicos de la comunidad Argo. En la actualidad, todas las boyas cuentan con sensores de presión fiables y precisos.

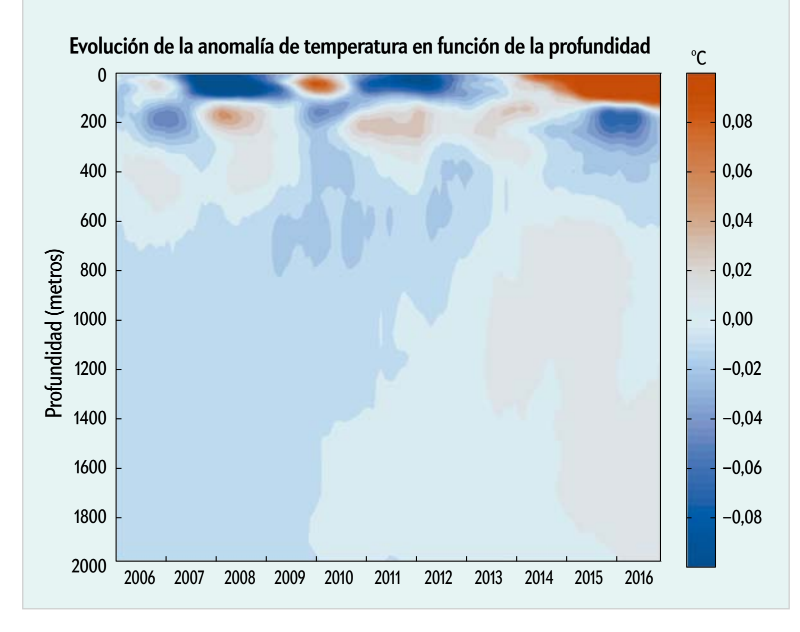
Como mencionábamos más arriba, las boyas de Argo consiguen determinar la salinidad a partir de la conductividad del agua. No obstante, medir la conductividad presenta una gran dificultad técnica debido a diferentes causas. Una de ellas es la biodeposición: las pequeñas acumulaciones de materia orgánica en los sensores. Aunque su efecto suele ser reducido, resulta del mismo orden que las variaciones naturales de salinidad que encuentra una boya en sus más de tres años a la deriva. Como consecuencia, uno de los principales obstáculos a los que se ha enfrentado la red desde sus inicios ha radicado en idear una técnica que permitiera discernir entre las variaciones naturales de la salinidad y las alteraciones del sensor debido a la biodeposición, entre otras causas. Durante los primeros años, investigadores de la Universidad de Washington y del Instituto Oceanográfico de Woods Hole, en Massachusetts, desarrollaron un método basado en comparar las medidas de cada boya en determinados niveles de profundidad, conocidos por poseer una salinidad estable aunque dependiente de cada zona. Este método, conocido como «calibración en modo diferido», se usa actualmente para cada una de las boyas y se repite cada seis meses para garantizar la exactitud de las medidas. Además, ofrece la posibilidad de no descartar mediciones que no coincidan con los registros históricos y que exhiban una variabilidad natural desconocida hasta la fecha.

EVOLUCIÓN TEMPORAL

Océano, clima y calentamiento

Argo ha brindado una oportunidad sin precedentes para empezar a entender el papel de los océanos en el actual contexto de calentamiento global. Hoy sabemos que la superficie del océano se encuentra unos 0,2 grados Celsius más caliente que en décadas previas. En particular, desde 2012 se ha observado un incremento en la temperatura promedio (*arriba*) asociado principalmente a un calentamiento en los 200 metros más superficiales y en las capas situadas por debajo de los 800 metros (*abajo*). Además, los datos de Argo han posibilitado entender dicho aumento de temperatura en términos de la cantidad de calor almacenada en los océanos.





ARGO ESPAÑA

Por último, en lo que respecta a los aspectos de cooperación internacional, la necesidad de cumplir con la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (el acuerdo internacional que rige el uso del océano entre países) constituyó uno de los mayores obstáculos a los que se enfrentó la red Argo para adquirir la categoría de global. Este problema fue solventado mediante la creación de la Oficina Internacional de Coordinación del programa Argo, la cual interviene cuando las boyas desplegadas en aguas internacionales llegan a las aguas jurisdiccionales de cualquier país por la acción de las corrientes oceánicas. Para cumplir con los requisitos de la ONU, la oficina realiza un seguimiento de todas las boyas y avisa al país en cuestión momentos antes de que una boya entre en sus aguas. Al mismo tiempo, el organismo asegura que cada nación pueda acceder a la localización de todas las boyas de la red y a los datos que toman.

EL FUTURO DE ARGO

De cara a los próximos años, Argo se enfrenta a varios retos. El primero de ellos es su propio mantenimiento, ya que la presencia de las boyas en todos los mares y océanos depende del tiempo de vida medio de sus baterías, el cual se cifra en 3,5 años. Ello implica que, para mantener la cobertura global actual, será necesario desplegar 750 unidades cada año. Una vez más, y a falta de una organización supranacional, el objetivo dependerá de que a él contribuyan cada uno de los 30 países que actualmente conforman la red.

El siguiente paso consistirá en adaptar la cobertura de la red a la dinámica del océano; en concreto, incrementar la resolución espacial (el número de boyas por grado de latitud y longitud) allí donde las aguas son más turbulentas y, por tanto, existe una interacción más intensa entre el océano y la atmósfera. Esto ocurre sobre todo en las «corrientes de contorno oeste», así llamadas porque tienen lugar en el límite occidental de los océanos, como ocurre con la corriente del Golfo en la costa este de EE.UU. o la de Kuroshio al este de Japón. En estas zonas, la variabilidad espacial y temporal de las estructuras oceánicas es mayor que en otras, por lo que la cobertura original de una boya cada 3 grados de longitud y latitud no permite estimar el flujo de calor con la precisión necesaria para entender la interacción entre el mar y la atmósfera. Otras áreas que requieren un aumento de la cobertura espacial son las próximas al ecuador, las cercanas a los polos y las zonas «de afloramiento», donde la dinámica del océano tiende a expulsar las boyas. Esta última situación se da en el afloramiento del noroeste de África, más conocido como banco canario-sahariano.

Aunque las 3784 boyas actuales parecen cubrir todo el océano, en realidad solo observan la mitad. Ello se debe a que no bajan más allá de los 2000 metros, si bien la profundidad media del océano supera los 4000. En los últimos años, varios estudios han demostrado que el agua situada por debajo de los 2000 metros contribuye de manera significativa al almacenamiento de calor y, con ello, al aumento del nivel del mar. Esto es consecuencia directa del incremento de temperatura provocado por la expansión térmica. Estos resultados se conocen gracias a datos dispersos obtenidos en todos los océanos desde el experimento WOCE. Sin embargo, el margen de error es relativamente grande, ya que hay zonas donde solo se ha medido una vez en su parte más profunda. Esta falta de datos obedece al elevado coste económico que supone efectuar medidas en zonas alejadas de la costa, lo que exige buques oceanográficos con capacidad para trabajar en alta mar.

Ante esta situación, la red Argo presenta una alternativa tecnológicamente viable para afrontar los estudios del océano

PARTICIPACIÓN ESPAÑOLA

Un proyecto estratégico para España y para Europa

En España, varios organismos de investigación, como el Instituto Español de Oceanografía, el Instituto de Ciencias del Mar del CSIC o las Universidades de Las Palmas de Gran Canaria y Málaga, entre otros, han llevado a cabo estudios con datos procedentes de la red Argo. Tales investigaciones han abarcado numerosos aspectos, desde el comportamiento de las corrientes marinas alrededor del archipiélago canario, en el Atlántico ecuatorial o el Índico, hasta el aumento de temperatura en el Atlántico, entre otros fenómenos.

La participación española en el programa internacional Argo comenzó en 2002 a través de un proyecto de cooperación europeo, durante el cual se desplegaron 80 boyas en el Atlántico Norte. Más tarde, el Instituto Español de Oceanografía, junto con otros organismos, coordinó una serie de acciones especiales del Ministerio de Educación y Ciencia mediante las que se financió el programa Argo España como tal. Ello supuso la adquisición de 43 boyas que fueron desplegadas a partir de 2003 según el interés científico de las instituciones participantes, principalmente en el mar Cantábrico, la cuenca canaria y el Mediterráneo occidental. Dos de las 43 boyas fueron donadas a Costa Rica y México en el marco de los programas de cooperación. Hoy, Argo España cuenta con un total de 65 boyas repartidas en el Atlántico Norte, el Atlántico Sur y el Mediterráneo. Hasta 2008, la observación oceánica en las cercanías de la península ibérica, Canarias y Baleares se había basado en su mayoría en boyas desplegadas por otros países.

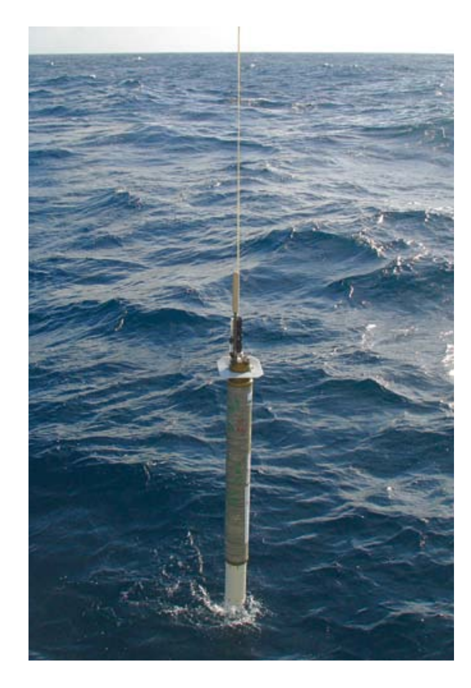
Por su parte, el interés de la Comisión Europea por la alta calidad científica y tecnológica de la red Argo llevó a que, a finales de 2006, la contribución comunitaria a dicho programa se incluyese en la hoja de ruta del Foro Estratégico Europeo sobre Infraestructuras de Investigación. Hoy, el proyecto Euro Argo contribuye al mantenimiento de un tercio de la red, lo que supone el despliegue de 250 boyas al año, una cifra basada en el peso del PIB europeo con respecto al PIB mundial.

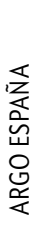
Conscientes de la importancia científica del programa Argo y de las oportunidades de desarrollo que presenta, el Instituto Español de Oceanografía y el Sistema de Observación Costero y de Predicción de las Islas Baleares han asumido el compromiso financiero que supone que España participe como miembro de pleno derecho en Euro Argo, para lo que han asegurado el despliegue de al menos 3 boyas al año desde 2015. El pasado 1 de enero de 2017, España se adhirió definitivamente a la infraestructura de Euro Argo como miembro de pleno derecho.





DE CARA AL FUTURO, el proyecto Argo intentará extender su cobertura más allá de los 2000 metros de profundidad. Estas imágenes muestran el lanzamiento de una boya NKE Deep Arvor, capaz de sumergirse hasta los 4000 metros, el 1 de noviembre de 2016 en el noroeste de la isla de La Palma. En el casco del instrumento pueden apreciarse algunas inscripciones en rojo (*arriba*): son mensajes de despedida escritos a mano por los investigadores, ya que lo más probable es que la boya no pueda recuperarse. En el momento de concluir este artículo, el instrumento llevaba 1,4 años trabajando con éxito en alta mar.





abisal. Ya existen prototipos europeos de boyas Argo con capacidad de inmersión hasta los 4000 metros, así como otros japoneses y estadounidenses con prestaciones similares. En concreto, el equipo de Argo España ha desplegado dos de ellos al noroeste del archipiélago canario, en una zona caracterizada por aguas que alcanzan los 4000 metros de profundidad. Tras un año de medidas continuas con cambios de unos 0,03 grados y 0,007 unidades de salinidad a 4000 metros, los datos obtenidos gracias a estos prototipos muestran la necesidad de un seguimiento continuo del océano profundo si queremos determinar con precisión su capacidad de almacenar calor y su efecto en el aumento de nivel del mar.

Aunque el acceso a los niveles más profundos se ha convertido en un reto hecho realidad, queda aún pendiente otro importante desafío en la observación del océano abisal: mejorar la precisión de las medidas de temperatura y salinidad. Actualmente las boyas de Argo miden datos con una precisión de 0,005 grados de temperatura y 0,01 unidades de salinidad. Sin embargo, estudiar los efectos del océano profundo en términos de acumulación de calor y cambio en el nivel del mar requiere que las medias se hagan con la misma precisión que las efectuadas desde buques oceanográficos; es decir, 0,001 grados y 0,002 unidades de salinidad.

En un principio, el programa Argo se concentró en desplegar una red capaz de medir temperatura y salinidad y, con ello, obtener una imagen fiable de la dinámica del océano. Este objetivo ya está cumplido. No obstante, el impacto del océano en el sistema climático depende, entre otros factores, de su capacidad para retener dióxido de carbono, la cual se halla asociada a la actividad del gran ecosistema que representa el propio océano. En este sentido, la posibilidad de usar una red similar a Argo para medir parámetros biogeoquímicos, como la concentración de oxígeno disuelto, su contenido en nutrientes, o la cantidad de clorofila, permitiría dar un salto cualitativo en nuestra capacidad para entender y predecir el funcionamiento del océano. Expandir la red Argo a parámetros biogeoquímicos constituye por tanto uno de los grandes retos a los que nos enfrentamos desde el punto de vista tecnológico. Otras metas incluyen la capacidad de incorporar sensores que puedan medir este tipo de variables durante más de tres años, así como el desarrollo de un sistema de análisis que permita discernir entre la variabilidad natural del área en el que se encuentra la boya y un posible mal funcionamiento de los sensores, como ya sucede con los de salinidad.

Los planes actuales contemplan una ampliación de la red hasta superar las 4400 boyas en 2020, el despliegue de una flota de 1000 boyas biogeoquímicas para el mismo año, así como la pronta creación de una matriz global de más de 1200 boyas capaz de llegar a las regiones abisales. Sin duda, todos estos avances volverán a revolucionar la oceanografía y nos ayudarán a entender mejor el proceso de cambio que atraviesa nuestro planeta. IyC

PARA SABER MÁS

Global surface layer salinity change detected by Argo and its implication for hydrological cycle intensification. Shigeki Hosoda et al. en *Journal of Oceanography*, vol. 65, págs. 579-586, noviembre de 2009.

Using Argo data to investigate the Meriodional Overturning Circulation in the North Atlantic. Alonso Hernández Guerra et al. en *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, vol. 57, n.º 1, págs. 29-36, enero de 2010.

Changes in temperature and salinity tendences of the upper subtropical North Atlantic Ocean at 24.5°N. Pedro Vélez Belchí et al. en *Journal of Physical Oceanography*, vol. 40, págs. 2546-2555, noviembre de 2010.

Unabated planetary warming and its anatomy since 2006. Dean Roemmich et al. en *Nature Climate Change*, vol. 5, págs. 240-245, febrero de 2015.

Fifteen years of ocean observations with the global Argo array. Stephen C. Riser et al. en *Nature Climate Change*, vol. 6, págs. 145-153, enero de 2016.

The Argo program: Present and future. Steven Jayne et al. en *Oceanography*, vol. 30, n.º 2, págs. 18-28, septiembre de 2017.

Página web de Argo España: **www.argoespana.es**

EN NUESTRO ARCHIVO

La acidificación de los océanos. Scott C. Doney en *IyC*, mayo de 2006.

La corriente del Golfo y el invierno europeo. Stephen C. Riser y M. Susan Lozier en *IyC*, abril de 2013.

Olas destructivas en el Ártico. Mark Harris en *IyC*, octubre de 2015.

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Las glándulas gástricas, de perfil

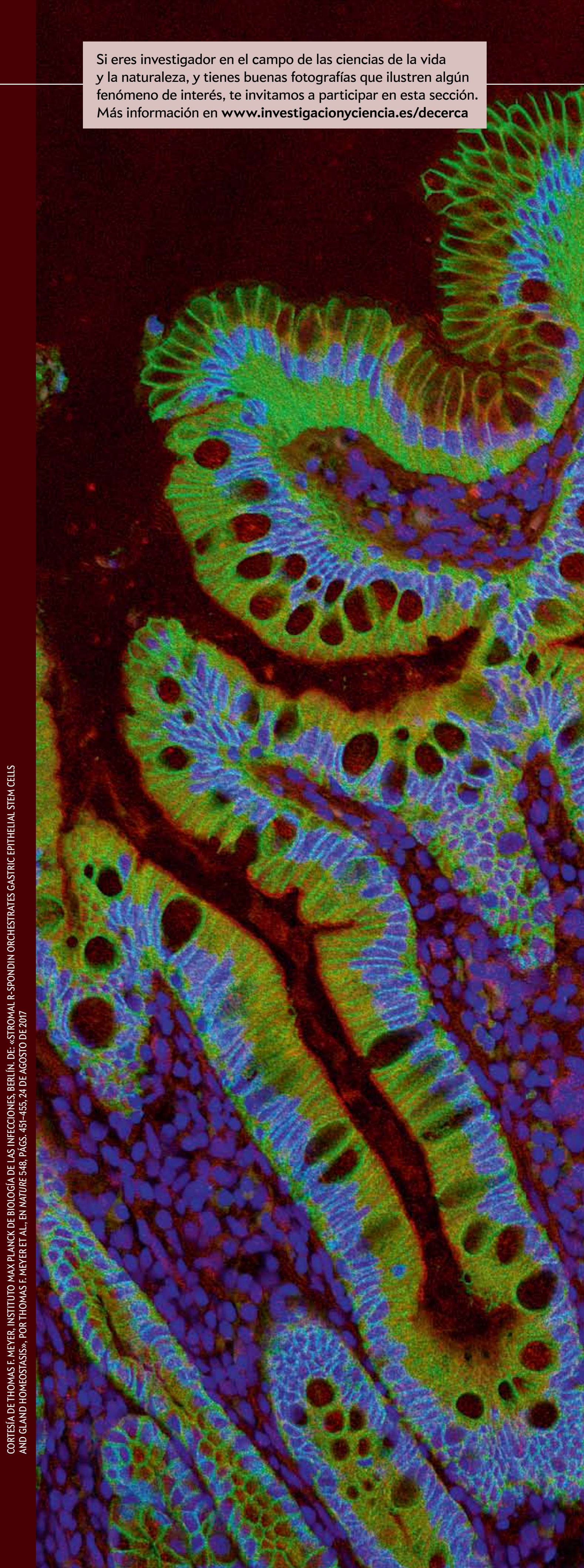
Las células del epitelio del estómago se dividen más deprisa en presencia de la bacteria patógena *Helicobacter pylori*

La regeneración constante del epitelio del estómago está impulsada por células madre de larga vida, pero el mecanismo que regula su recambio no se conoce bien. Recientemente, Thomas Meyer, del Instituto Max Planck de Biología de las Infecciones, y su equipo han descubierto que el patógeno gástrico *Helicobacter pylori* puede activar las células madre gástricas y aumentar la renovación epitelial.

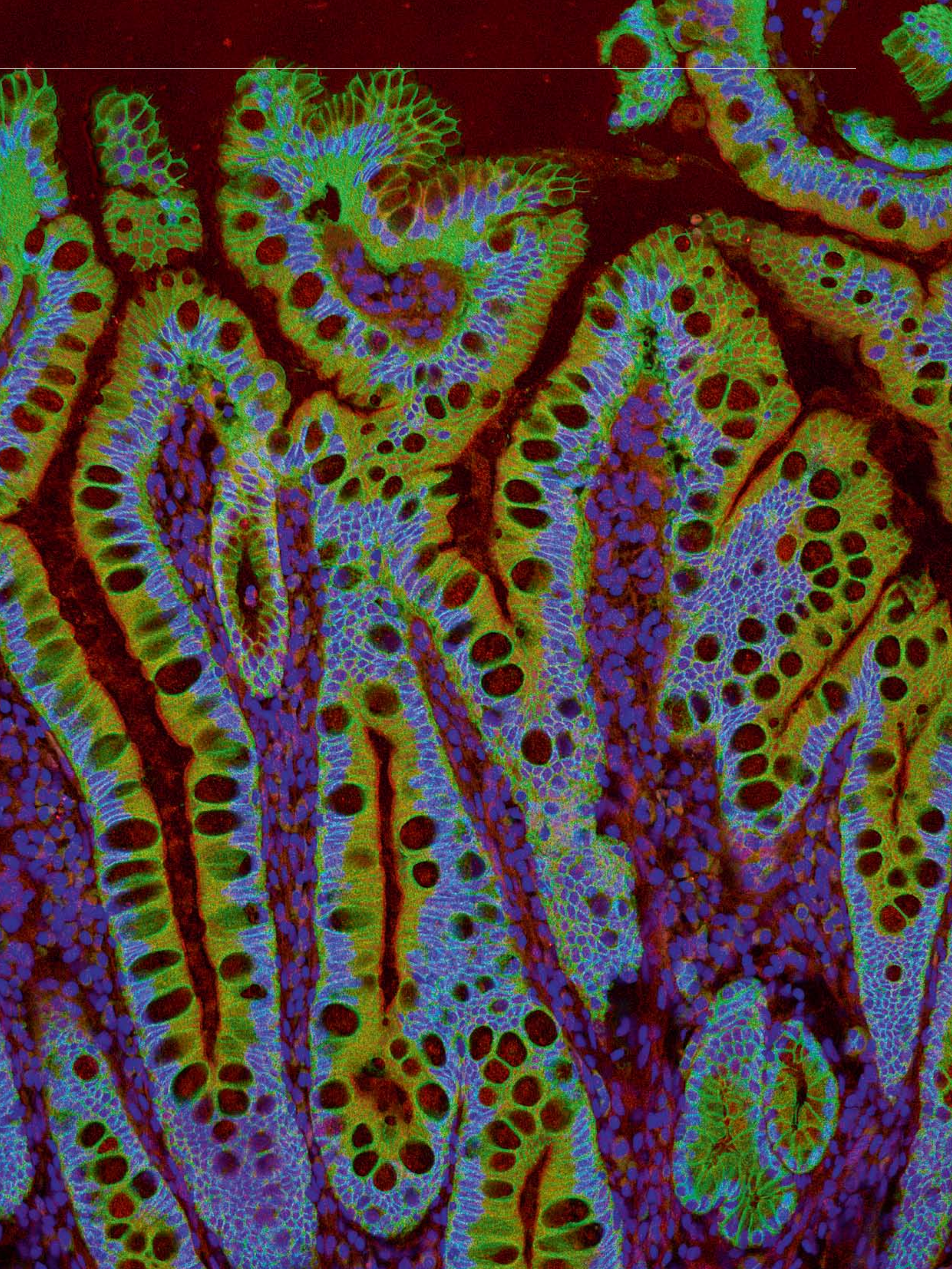
Los investigadores han examinado el tejido gástrico de ratones mediante microscopía confocal, que permite visualizar con detalle una preparación del tejido. Han descubierto que las células situadas en la base de las glándulas del estómago producen más cantidad de la proteína R-espondina 3 cuando son infectadas por la bacteria *Helicobacter pylori*. Esta proteína empuja a las células madre a dividirse más deprisa y, por consiguiente, favorece la aparición del cáncer de estómago. La capacidad de las células de la base de las glándulas para controlar y adaptar la dinámica de las células madre epiteliales constituye un mecanismo complejo que dirige la regeneración epitelial y el mantenimiento de la integridad del tejido.

En la imagen, las membranas celulares de las glándulas gástricas aparecen (con las marcas correspondientes) en verde, el ADN (es decir, los núcleos celulares) en azul y las moléculas de actina, que conforman la estructura celular, en rojo. En el caso de que se solape la actina con el núcleo celular o con la membrana, se produce la transición correspondiente de colores.

La redacción



CORTESÍA DE THOMAS F. MEYER, INSTITUTO MAX PLANCK DE BIOLOGÍA DE LAS INFECCIONES, BERLÍN. DE: «STROMAL R-SPONDIN ORCHESTRATES GASTRIC EPITHELIAL STEM CELLS AND GLAND HOMEOSTASIS», POR THOMAS F. MEYER ET AL., EN *NATURE* 548, PÁGS. 451-455, 24 DE AGOSTO DE 2017



por Amparo Gómez



Amparo Gómez fue catedrática de lógica y filosofía de la ciencia en la Universidad de La Laguna. Falleció en marzo de 2018, poco antes de que la versión final de este texto fuese enviada a imprenta. A modo de homenaje, dedicamos la publicación de este artículo al recuerdo de su persona y obra.

La filosofía de las ciencias sociales

Una ontología para la explicación del cambio social y su relación con la filosofía de las ciencias naturales

La reflexión filosófica sobre el conocimiento social tiene una larga trayectoria que se remonta al origen de las propias ciencias sociales. A lo largo de este tiempo, la filosofía de las ciencias sociales ha buscado inspiración en la filosofía de la física o de la biología, así como en modelos estructuralistas, sistémicos y cibernéticos. Además, presenta un acento u otro según las distintas disciplinas sociales que estudia: economía, sociología, antropología, historia o ciencia política.

Por todo ello, resulta evidente la dificultad de dar cuenta de la filosofía de las ciencias sociales (aun dejando fuera las corrientes hermenéuticas, que cuestionan justamente el carácter científico de los estudios sociales). Así pues, en lo que sigue nos centraremos solo en la filosofía de las ciencias sociales que, de una manera u otra, se sitúa en la estela de la filosofía de la física. Ello dejará al margen otros enfoques, pero la elección se justifica por cuanto esta forma de hacer filosofía de las ciencias sociales ha sido y es la predominante.

La filosofía de las ciencias sociales así entendida se ha basado sucesivamente en las ideas del empirismo lógico, el racionalismo crítico de Popper, el pensamiento de Imre Lakatos y Thomas Kuhn, así como en la filosofía de la ciencia poskuhniana. En las últimas décadas, y siempre dentro del enfoque señalado, podemos encontrar nuevas corrientes. Nos referimos al marxismo analítico, a la perspectiva de los mecanismos sociales, a la teoría del intercambio social y a la economía de los microfundamentos (atenta al comportamiento de hogares y empresas).

A pesar de sus diferencias, en estas corrientes encontramos un denominador común. Todas parten de una cierta ontología según la cual los constituyentes últimos de la realidad social son los actores sociales, sus acciones y las consecuencias de estas. A partir de ahí se intenta explicar el cambio social. Es decir, la sociedad no es tomada como un todo orgánico, sistémico o cibernético con dinámicas propias, sino que se explica a partir de dichos actores y sus acciones. Se suelen llamar «intencionales» los efectos que los agentes buscan al llevar a cabo una acción. Sin embargo, cada acción puede producir, además, otros efectos no buscados, denominados «causales».

Es decir, los fenómenos sociales no son siempre el resultado de las intenciones de los actores, sino que en ocasiones lo son también de las consecuencias no buscadas de esas acciones e interacciones. Lo anterior no excluye que ciertos eventos sociales sean explicados únicamente en términos intencionales. Y, al mismo tiempo, existen mecanismos causales que no implican intencionalidad y que actúan a espaldas de los individuos (los científicos sociales hablan de mecanismos como «el cambio endógeno de preferencias» o «la aversión a la pérdida»). Con todo, en numerosas ocasiones, las ciencias sociales tendrán que apelar de manera conjunta a las decisiones intencionales y a los mecanismos causales.



Esta ontología implica una metodología concreta. Así entendidas, las ciencias sociales deberán estudiar la lógica de las acciones individuales o colectivas, las constricciones que las afectan, su naturaleza racional y estratégica, así como sus efectos intencionales y causales. A partir de ello irán forjándose modelos teóricos y leyes para intentar explicar la realidad social. Entre dichos modelos encontramos las teorías de la acción y la elección racional; la teoría de juegos; las teorías de la cooperación, el riesgo y la incertidumbre; e incluso las teorías bioevolutivas del egoísmo y el altruismo.

Con todo, pudiera parecer que el modelo de la física tiene sus limitaciones a la hora de pensar en las ciencias sociales. Estas parecen presentar ciertas peculiaridades, tanto por la complejidad del objeto de estudio y la naturaleza especial de sus leyes y explicaciones, como por el grado de implicación del sujeto investigador en el propio objeto social que estudia. Lo curioso es que la filosofía de la ciencia actual nos ha mostrado que los sistemas estudiados por la física también pueden resultar muy complejos, que el carácter determinista y universal de las leyes físicas también puede cuestionarse, y que el observador también afecta a los sistemas físicos observados.

Complejidad y leyes sociales

Atendamos primero a la cuestión de la complejidad o simplicidad de los mecanismos sociales. Algunos autores abogan a favor de su simplicidad, básicamente para tratar la sociedad en términos de un método resolutivo-compositivo como el que es usual en física. Ello implica que es en los niveles más simples de los fenómenos donde se configuran los mecanismos que los originan. Al mismo tiempo, desde po-

siciones más colectivistas se destaca que ciertos fenómenos sociales podrían implicar formas más complejas de causalidad. Sin embargo, salvo visiones extremas, la tendencia más común consiste en considerar que la simplicidad y la complejidad son relativas al tipo de fenómeno considerado, pero que la causalidad social opera siempre al nivel de las acciones, sus restricciones y sus consecuencias.

En cuanto al problema de las leyes, habrá que recordar que los mecanismos sociales son, en general, tendencias o probabilidades, las cuales constituyen en muchas ocasiones auténticas leyes. Por otro lado, las leyes sociales presentan la interesante característica de no ser universales. John Stuart Mill explicó por qué a través de la noción de «causas perturbadoras», y la filosofía posterior lo hizo recurriendo a la cláusula *ceteris paribus* («permaneciendo lo demás igual»). En estas leyes, la relación universal y necesaria que se afirma (por ejemplo, «siempre que aumenta la demanda sube el precio») es perturbada por otras causas. Eso significa que la ley no siempre se cumple, ya que en ocasiones las cosas ocurren de otra manera debido a causas perturbadoras. La ley solo funciona cuando el resto de los factores se mantienen iguales. Con posterioridad, esta concepción fue generalizada a las leyes naturales por algunos filósofos de la ciencia, quienes argumentaron que muchas de las leyes científicas aparentemente universales son, de hecho, leyes *ceteris paribus* y, por tanto, tendencias o leyes probabilísticas.

Esa concepción de las leyes conlleva una cierta teoría de la causalidad. De ella fue precursor Mill, al plantear que las causas son compuestas, plurales y pueden ser interferidas por otras. Según escribía Mill en *A system of logic*, «un mismo efecto puede ser causado por diversos agentes, y diversos agentes pueden causar partes de un mismo efecto». Esta forma de causalidad es la que opera en los mecanismos sociales. Pero también podemos encontrarla en las ciencias naturales, según argumentan, entre otros, los filósofos contemporáneos Wesley Salmon, Nancy Cartwright, Lewis Mumford, Anjan Chakravartty o Sydney Shoemaker. Como Cartwright afirmó en su libro *How the laws of physics lie*: «Los objetos naturales son muy parecidos a las personas en sociedad. Su conducta está constreñida por algunas leyes específicas y por un puñado de principios generales, pero no está determinada en detalle, ni siquiera estadísticamente».

Por otro lado, aunque ciertas tendencias sociales se refieren al ámbito del comportamiento intencional y pueden constituir auténticas leyes, es también cierto que muchas otras tendencias y generalizaciones similares no forman leyes genuinas. A ello hay que sumar que en las ciencias sociales encontramos también generalizaciones que se limitan a meras correlaciones. De hecho, muchas veces solo es posible establecer correlaciones, analogías o simulaciones que marcan rutas explicativas.

Todo lo dicho hasta aquí nos deja con distintas formas de explicación en las ciencias sociales. Están las explicaciones causales, basadas en tendencias y probabilidades; y también las intencionales, que aclaran por qué ocurrió algo apelando a leyes o a procesos intencionales. En este caso es frecuente establecer antecedentes particulares (creencias, preferencias y objetivos de los sujetos) para dar cuenta de acciones o eventos singulares. Además, la propia explicación causal puede limitarse a usar mecanismos particulares en lugar de leyes. Como se ha señalado desde el enfoque de los microfundamentos, en ausencia de leyes, la detección de mecanismos particulares que causan hechos concretos constituye una buena forma de explicación científica.

Quizá habría que añadir a estas formas de explicación la llamada «explicación funcional». No obstante, esta ha sido cuestionada por diversos filósofos, para quienes habría auténticas explicaciones funcionales en biología o en medicina, pero no en las ciencias sociales. La explicación funcional en ciencias sociales suele entenderse simplemente como un primer paso, indicado solo en los ámbitos que en un momento dado se muestran refractarios a la explicación causal o intencional.

La implicación del observador

Vayamos, por último, a la cuestión del sujeto investigador y su implicación en el propio objeto. Las prácticas de investigación han constituido un tema tradicional de la filosofía de las ciencias sociales. La atención prestada a esta cuestión se debe a que en ella se jugaba, en buena medida, la cientificidad de unas disciplinas que presentaban dificultades en el plano empírico. Téngase en cuenta que los experimentos sociales no resultan fáciles de llevar a cabo y suelen ser improcedentes, y recuérdese también que el investigador siempre está, de un modo u otro, afectado por la dinámica social que estudia.

Sin embargo, la situación ha cambiado. Se reconoce ahora que la normatividad clásica con respecto a la investigación difícilmente se cumple en ningún caso, ni siquiera en el de las ciencias naturales, por lo que el componente normativo de la filosofía de la ciencia se ha reducido y flexibilizado. Cualquier práctica científica integra factores de diversa naturaleza, incluidos los de naturaleza social, económica, política e incluso moral.

En suma, la filosofía de las ciencias sociales sigue abordando temas clásicos, como la causalidad, la intencionalidad, las leyes o la explicación. No obstante, lo que ha cambiado es el tratamiento filosófico de estas cuestiones. La filosofía de las ciencias sociales sigue incluyendo indicaciones normativas, pero estas son mucho más flexibles que las que se buscaban a principios del siglo xx.

Esta normatividad se combina, además, con una dimensión descriptiva e incluso naturalizadora, que recurre tanto a las propias ciencias sociales como a las naturales. La investigación científica es hoy entendida como una acción significativa no solo epistémicamente, sino también desde el punto de vista práctico. Lo que implica, como ha mostrado el filósofo inglés Philip Kitcher, que la filosofía de las ciencias sociales puede legítimamente explorar también los aspectos éticos, políticos y sociales implicados en la investigación, en sus resultados y en sus aplicaciones. IyC

PARA SABER MÁS

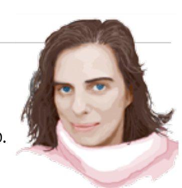
Filosofía y metodología de las ciencias sociales. Amparo Gómez. Alianza, 2003.
Explaining social behavior: More nuts and bolts for the social sciences. Jon Elster. Cambridge University Press, 2007.
Social mechanisms and explanatory relevance. Peter Ylikoski en *Analytical sociology and social mechanisms*, dirigido por Pierre Demeulenaere. Cambridge University Press, 2012.
Explanatory autonomy and Coleman's boat. Daniel Little en *Theoria*, vol. 27, n.º 2, págs. 137-151, mayo de 2012.
Are the social mechanisms the antonym of laws? Amparo Gómez en *Epistemologia*, vol. 38, n.º 1, págs. 31-46, septiembre 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Termodinámica social. Stefan Pohl Valero en *IyC*, diciembre de 2012.
La irrupción de las masas y la sabiduría colectiva. J. Francisco Álvarez en *IyC*, julio de 2014.
La filosofía de la economía. María Jiménez Buedo en *IyC*, mayo de 2017.

por Ester Conesa Carpintero

Ester Conesa es investigadora doctoral en la Universidad Abierta de Cataluña. Su trabajo analiza el modelo científico actual y las carreras académicas desde la perspectiva de género.



¿Es desinteresada la ciencia?

Productividad, libertad de conocimiento y vida sostenible en la labor científica

Dentro del apasionante mundo de la ciencia se esconden, a menudo, relaciones, prácticas y situaciones que no siempre encajan con la visión idealizada que suele tenerse de ella. En un seminario internacional celebrado el pasado diciembre («*Collateral damages of prevailing scientific practice*») y organizado por profesores de la Universidad Abierta de Cataluña y la Universidad Autónoma de Barcelona, se ha debatido sobre los cambios que está experimentando el mundo científico debido a fenómenos como la economía del conocimiento o la nueva gestión pública. Se han analizado algunos de sus efectos y las posibles formas de hacer ciencia de una manera diferente.

La ciencia ha mantenido siempre estrechos lazos con el poder. No en balde, en el pasado algunos científicos obtuvieron apoyo para desarrollar ciertos saberes o técnicas en función de los intereses de quienes estaban en el poder. Si bien esa tendencia todavía persiste, desde finales del siglo XIX y hasta tiempos recientes la ciencia se consideraba un bien común —o, al menos, los intereses privados se habían equilibrado con los públicos—, y las universidades promovían el desarrollo del conocimiento desde una posición de autonomía.

Sin embargo, de un tiempo a esta parte la ciencia como bien público, o desinteresada, ha ido perdiendo fuerza y han proliferado las políticas y prácticas que apoyan los avances en función del desarrollo económico, lo que ha dado lugar al llamado capitalismo académico. La autonomía de la universidad es ahora financiera: puede patentar productos o multiplicar sus relaciones con la empresa privada.

El valor académico se mide en términos de productividad. La calidad de los artículos, elemento central de la investigación, se mide cuantitativamente, de forma que no es suficiente su difusión en una revista relevante del área científica relacionada. La revista debe tener un alto factor de impacto, un sistema de evaluación (hasta hace poco propiedad de una gran multinacional) basado en el número de citas anuales que obtienen sus artículos: cuanto más numerosas son, más prestigio se le atribuye a la revista, una valoración no exenta de controversia [*véase* «La tiranía del factor de impacto», por R. Werner; Investigación y Ciencia, marzo de 2015]. Para poder consultar estas publicaciones y acceder al conocimiento desarrollado (y revisado) por los científicos, universidades y centros de investigación públicos pagan importantes cantidades de dinero a grandes empresas editoriales que obtienen márgenes de beneficio asombrosos.



Menos conocidas por la población general son las condiciones en que se produce esa ciencia y los cambios que ha sufrido la profesión. Muchos científicos luchan día a día en situaciones de precariedad e incertidumbre laboral. Los recortes por la crisis económica han empeorado la situación, lo que ha originado largas colas de espera y una alta competitividad para optar a una plaza. En algunos centros e instituciones científicas, la lucha por los recursos —a veces el salario depende de los proyectos conseguidos, asociados a las publicaciones de impacto— crea asimismo una presión de trabajo abrumadora, en búsqueda de resultados que puedan publicarse en las revistas de alto impacto. El tiempo para el aprendizaje o el error se constriñe. No es de extrañar que bajo estas condiciones se hayan detectado prácticas que afectan o disminuyen la calidad científica. Pareciera que la cultura de los indicadores de la excelencia —concepto no libre de ambigüedades— se hubiera girado en contra de la propia excelencia.

Una financiación restringida y dirigida a unos temas, y no a otros, merma la libertad científica; el factor de impacto moldea también esa libertad. Al avanzar la práctica científica hacia unas direcciones y no hacia otras, perdemos diversidad de conocimiento. Pero también perdemos diversidad de personal científico, pues ¿quién puede aguantar el ritmo acelerado y las presiones de una ciencia que normaliza trabajar más horas de las estipuladas por contrato? Fines de semana y noches de trabajo no encajan con una vida sostenible. Ni tampoco con nociones como familia, vínculos o participación social. O con tareas domésticas, cuidados a terceros o descanso. En una sociedad avanzada, todas las personas, independientemente de su género, clase o raza, deberían poder participar de forma igualitaria, sostenible y saludable en la labor científica.

Como respuesta a esta situación, se han generado movimientos e iniciativas de resistencia a escala internacional, europea y nacional. Algunos de ellos se han concretado en declaraciones o publicaciones que inciden en la evaluación de la docencia, como el manifiesto del colectivo Indocentia; en la evaluación de la investigación, como la Declaración DORA o el Manifiesto de Leiden [*véase* «El Manifiesto de Leiden», por I. Ràfols; Investigación y Ciencia, septiembre de 2015]; o en la práctica científica, como los llamamientos a la ciencia lenta y la ciencia lenta feminista (*feminist slow scholarship*). Todas esas iniciativas proponen estrategias que pueden llevarnos a desarrollar una ciencia más desinteresada y en condiciones más saludables.



QUÍMICA

LA ISLA DE LOS PESOS PESADOS

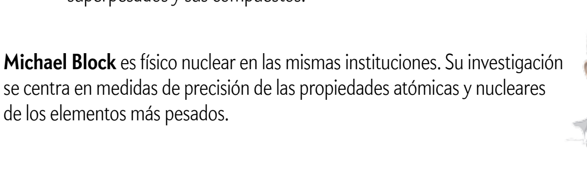
Se ha iniciado la carrera para crear los elementos más pesados de la tabla periódica y explorar la «isla de estabilidad», donde subsistirían más de un instante

Christoph E. Düllmann y Michael Block


115

Christoph E. Düllmann es químico nuclear de la Universidad Johannes Gutenberg y el Instituto Helmholtz, ambos en Maguncia, así como del Centro GSI Helmholtz de Investigación de Iones Pesados, en Darmstadt. Estudia la síntesis y las propiedades químicas y nucleares de elementos superpesados y sus compuestos.

Michael Block es físico nuclear en las mismas instituciones. Su investigación se centra en medidas de precisión de las propiedades atómicas y nucleares de los elementos más pesados.



El elemento más pesado descubierto jamás por el ser humano se llama oganesón. Cada uno de sus átomos encierra la friolera de 118 protones en su denso núcleo. Por el contrario, el átomo de hidrógeno —el elemento más abundante en el universo, presente en nuestro el organismo, en los océanos de la Tierra o en la atmósfera de Júpiter— solo contiene uno. El descubrimiento del oganesón se anunció en 2006, cuando un equipo ruso-estadounidense usó un acelerador de partículas en Dubna para disparar trillones de iones de calcio a un blanco de átomos pesados. Al cabo de 1080 horas de colisiones, habían obtenido tres átomos de esta nueva sustancia superpesada. Unos milisegundos más tarde, habían desaparecido.

Sin embargo, considerando cuidadosamente toda la radiación y los átomos más ligeros que habían producido las reacciones, los científicos del Instituto Conjunto de Investigación Nuclear de Rusia tuvieron casi la certeza de que, por un brevísimo instante, habían conseguido crear el elemento. En 2015, tras más de un decenio de comprobaciones y revisiones, el elemento 118 se unió oficialmente a la tabla periódica, la lista maestra de la materia. Recibió su nombre en honor a Yuri Oganessian, físico del instituto ruso y pionero de estas investigaciones.

Pero ¿cuántos elementos más existen? En la última década se han forzado cada vez más las fronteras de la tabla periódica y se han obtenido átomos nuevos cada vez más pesados que los anteriores. Cada una de las piezas fundamentales de la naturaleza recogidas en la tabla se define por el número de protones empaquetados en su núcleo atómico. Al mismo tiempo que se hacía oficial el oganesón, se añadían también elementos con 113, 115 y 117 protones por átomo. Uno de nosotros (Düllmann) ha llevado a cabo algunos de los primeros experimentos de química con varios de estos nuevos elementos superpesados; otro (Block) ha trabajado en las primeras mediciones directas de la masa de algunos de ellos, así como en otras investigaciones. Cada nueva especie que descubrimos es emocionante porque representa un material desconocido, una forma de materia con la que los seres humanos nunca antes nos habíamos topado.

No obstante, no podemos conservarlos. Los pocos átomos que producimos existen solo por un breve instante antes de descomponerse o transformarse por la tensión que genera una cantidad excesiva de protones, cargados todos positivamente y que, por lo tanto, se repelen unos a otros. Sin embargo, sospechamos que aún han de descubrirse ciertos elementos superpesados e isótopos (versiones de un mismo elemento pero con distinto número de neutrones) que podrían romper con esa enervante existencia fugaz que hace que se nos escapen de las manos. Creemos que algunas de esas nuevas especies podrían aguantar minutos o incluso años sin desintegrarse. En tal caso, formarían una región largamente buscada de la tabla periódica conocida como «isla de estabilidad». Gracias a una configuración especial del núcleo que le otorga una estabilidad inusual, cabe la posibilidad de que

EN SÍNTESIS

Se están tratando de crear elementos cada vez más pesados forjando átomos cuyos núcleos contienen cada vez más protones.

La mayoría de estos elementos «superpesados» tienen una vida media sumamente corta. Pero la teoría predice que, si se producen átomos con la combinación apropiada de protones y neutrones, estos podrían ser estables y subsistir minutos, días o incluso años.

Esos átomos formarían una «isla de estabilidad» en la tabla periódica de los elementos. Los investigadores creen que varios átomos descubiertos recientemente podrían hallarse en los límites de dicha región.

PÁGINAS ANTERIORES: MICHAEL MANOMIVIBUL

La tabla periódica de los elementos

La tabla esencial de la química recoge todos los elementos conocidos ordenados según el número de protones que contiene cada núcleo. Los científicos están afanándose en expandirla y buscan elementos pesados que incluyan cada vez más protones. Estos elementos «superpesados» (*rosa*) deben sintetizarse en el laboratorio, pues son demasiado inestables para existir en la naturaleza; muchos tienden a desintegrarse muy poco tiempo después de haberse formado.

Número atómico (número de protones que se encuentran en el núcleo del átomo)

H 1																	He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54
Cs 55	Ba 56	* 57–71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	** 89–103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118
119	120																

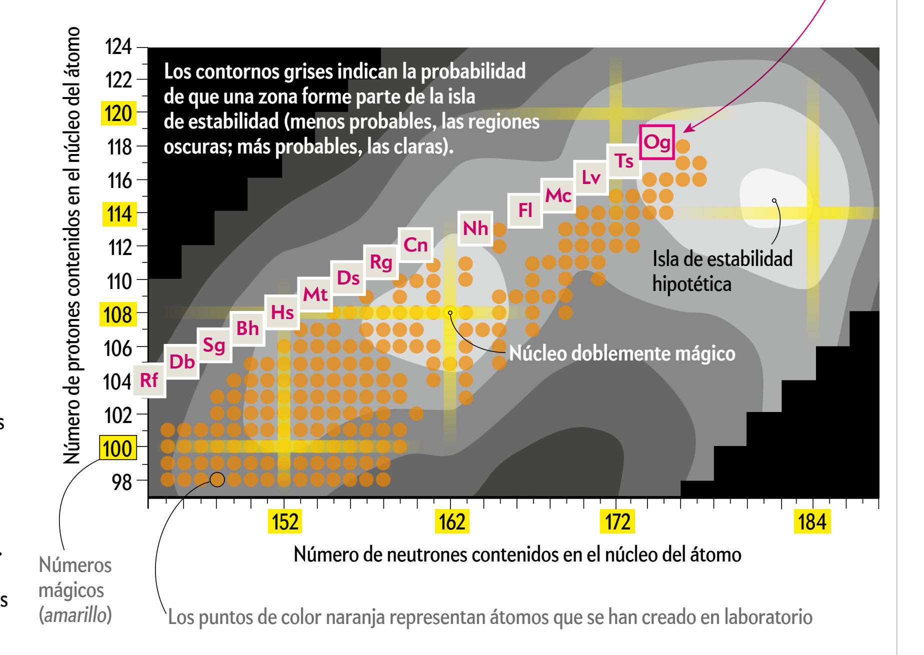
Posiciones hipotéticas de los elementos 119 y 120, aún desconocidos

Los lantánidos (*) y los actínidos (**) se agrupan juntos fuera del cuerpo principal de la tabla debido a sus propiedades químicas similares.

*	La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71
**	Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103

Isla de estabilidad

Como cada protón suma una carga positiva que repele a los demás protones, cuanto mayor sea el número de estas partículas en el núcleo, mayor será la probabilidad de que este se fragmente. Sin embargo, se cree que algunos átomos aún no descubiertos podrían rebelarse contra esta tendencia y llegar a ser estables gracias a ciertas configuraciones especiales de protones y neutrones. En un núcleo, estas partículas se disponen en «capas», cada una de las cuales aloja un número específico de partículas. Una capa alcanza su mayor estabilidad cuando se llena totalmente. Los números de protones y neutrones que se requieren para completarlas se denominan «números mágicos». Curiosamente, es más probable que algunos números sean mágicos cuando se combinan con otros. La teoría sugiere, por ejemplo, que un núcleo con 114 protones y 184 neutrones podría ser «doblemente mágico», aunque todavía no se ha creado ningún átomo con tal combinación. Se cree que estos átomos podrían pertenecer a la «isla de estabilidad», donde los elementos superpesados tendrían vidas más largas.



FUENTE: CHRISTOPH E. DÜLLMANN; JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

los elementos superpesados que habitan en esa región no sean solo efímeras creaciones de laboratorio, sino que perduren. En fecha reciente, se han encontrado átomos que quizá representen las orillas de dicha isla.

El elemento 114, por ejemplo, se desintegra algo más despacio de lo que predicen diversos cálculos para un átomo con tantos protones. Y el período de semidesintegración (es decir, el tiempo que tardan la mitad de los átomos de una muestra en descomponerse en otro elemento) de algunos de los elementos superpesados descubiertos hace poco, aunque sigue siendo muy corto, se va alargando a medida que aumenta el número de neutrones, las partículas sin carga que acompañan a los protones en el núcleo atómico. Estas observaciones se ajustan a las predicciones: tradicionalmente, se conjetura que la isla de estabilidad radica en una región de la tabla periódica donde los átomos contienen alrededor de 114 protones y, además, un número de neutrones mayor que el de cualquier especie creada hasta la fecha. Sin embargo, el descubrimiento de estos tiempos de vida ligeramente mayores (apenas una fracción de una fracción de segundo más largos) ha dado ímpetu a una búsqueda que ha impulsado a varias generaciones de investigadores. Ahora que hemos comenzado a explorar la isla de la estabilidad, esperamos trazar sus límites, establecer la ubicación de su centro —la localización de los isótopos más estables— y averiguar durante cuánto tiempo pueden existir esos átomos.

Ahora que hemos comenzado a explorar la isla de la estabilidad, esperamos trazar sus límites, establecer la ubicación de su centro —donde se encuentran los isótopos más estables— y averiguar durante cuánto tiempo pueden existir esos átomos

En los últimos años hemos aprendido algunas cosas fascinantes sobre esos extraños habitantes de los confines de la tabla periódica. Nuestras técnicas de laboratorio se han desarrollado hasta el punto de que nos permiten estudiar la química de los elementos superpesados que creamos, y determinar, por ejemplo, si serían metales o gases a temperatura ambiente. Si alguna vez conseguimos producir un kilogramo de ellos, quizá veamos propiedades completamente nuevas —y potencialmente útiles— que los distingan del resto de los materiales conocidos. Y aunque las sustancias que fabriquemos sigan desintegrándose demasiado pronto para sostenerlas en la mano, nos ayudarían a entender mucho mejor la química y la naturaleza fundamental de la materia.

EXPLORAR LA ISLA

La tabla periódica refleja el intento continuado de la química de cartografiar esa naturaleza fundamental. Fue desarrollada en el siglo XIX, de manera más clara por el químico Dmitri Mendeléyev y, sin relación con él, por el químico Julius Lothar Meyer. En ella los elementos aparecen ordenados según su número atómico (el número de protones por átomo) y agrupados de acuerdo a sus similitudes en la manera en que reaccionan con otros elementos para formar compuestos.

Tras la llegada de la tabla periódica, los químicos empezaron a preguntarse casi inmediatamente hasta dónde se extendería. El elemento más pesado existente en grandes cantidades en la naturaleza es el uranio, cuyos átomos alojan 92 protones. Sin embargo, conforme crece el número de protones en un núcleo, aumenta la carga positiva de este así como la correspondiente fuerza de Coulomb, que hace que las cargas del mismo signo se repelan. Llega un punto en que dicha fuerza vence a la interacción nuclear fuerte, de carácter atractivo, la cual mantiene unidos los núcleos atómicos. Cuando eso ocurre, se desencadena un proceso denominado fisión en el que el núcleo se divide.

Pero la estabilidad de un elemento concreto no se explica tan solo por el número de protones; depende también de la disposición de los protones y los neutrones en el interior del núcleo. Según el modelo de capas, propuesto a finales de los años cuarenta por los premios nóbel Maria Goeppert Mayer y J. Hans D. Jensen, ambas partículas constituyentes llenan las denominadas capas nucleares, ocupadas por un número específico de protones unas y de neutrones otras, y que vienen a ser análogas a las capas electrónicas que rodean al núcleo. En ambos casos, los niveles llenos dan lugar a uniones más fuertes que, además, aportan estabilidad al núcleo.

El modelo de capas se concibió al advertir que, para determinados números de protones y de neutrones (2, 8, 20, 28, 50 y 82 de cada una de esas partículas), los núcleos son más estables y difíciles de fragmentar. Pronto quedó claro que esos «números mágicos» correspondían a capas completas. En los átomos que conocemos, los números mágicos son los mismos para los protones y para los neutrones, pero no existe ninguna garantía de que vayan a continuar coincidiendo para ambas partículas. Un núcleo en el que tanto las capas de protones como las de neutrones están llenas recibe el nombre de «doblemente mágico».

Todavía hay mucho que no entendemos acerca de estas distribuciones mágicas. Por ejemplo, ¿cuánto valen los números mágicos para los núcleos que aún no hemos descubierto? Algunas predicciones teóricas pronostican la existencia de un núcleo superpesado doblemente mágico con 114 protones y 184 neutrones.

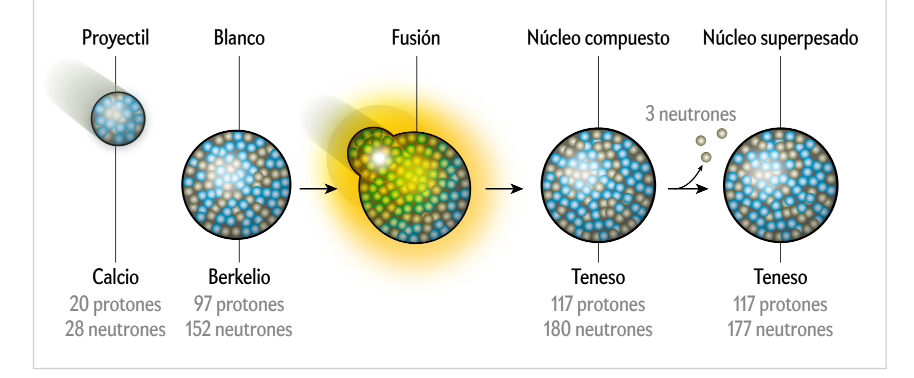
A pesar de que en el laboratorio hemos creado el elemento 114, no hemos sintetizado una versión con 184 neutrones. Sin embargo, esta combinación, predicha por primera vez en los años sesenta, se supone que aportaría al isótopo una estabilidad tan extraordinaria que su período de semidesintegración se acercaría a la edad de la Tierra. Esta predicción constituyó, además, el primer atisbo de la isla de estabilidad, un concepto que a la sazón inflamó el campo de entusiasmo y que hoy continúa impulsando la investigación.

No obstante, aún ignoramos, si 114 y 184 constituyen una verdadera combinación mágica. Otros marcos teóricos determinan, por ejemplo, configuraciones de 120 o 126 protones y 172 neutrones. Varias de nuestras estimaciones de futuros números mágicos están en deuda con Albert Einstein, quien explicó la sorprendente observación de que la masa de un átomo es inferior a la suma de las masas de sus protones, neutrones y electrones constituyentes. Su famosa fórmula $E = mc^2$ establece que este defecto de masa refleja la energía de enlace del núcleo (es decir, la energía que lo mantiene unido). Por ello, pesar átomos con distintas composiciones de protones y neutrones nos permite identificar aquellas configuraciones que dan lugar a una unión más fuerte (en otras palabras, configuraciones que corresponden a números mágicos) y determinar cuánto aumenta su estabilidad.

TÉCNICAS

Creación de elementos superpesados

Para producir un elemento superpesado se acelera un núcleo, el «proyectil», hacia otro, el «blanco», con la esperanza de que ambos se fusionen. Para vencer la fuerza de repulsión entre ambos núcleos, cargados positivamente, el proyectil debe moverse a alrededor del 10 por ciento de la velocidad de la luz. Bajo tales condiciones, el proyectil y el blanco se aproximan hasta casi tocarse, momento en que interviene la interacción nuclear fuerte, de carácter atractivo. En el ejemplo mostrado aquí, el elemento teneso se obtiene fusionando calcio y berkelio. Tras la unión, el «núcleo compuesto» elimina tres neutrones y da lugar a un núcleo superpesado de teneso con 117 protones y 177 neutrones.



Sean cuales sean los próximos números mágicos, creemos que empezamos a vislumbrar la isla de estabilidad. Los experimentos han determinado que los períodos de semidesintegración de los elementos superpesados aumentan con el número de neutrones, lo que sugiere que nos hallamos cerca del próximo número mágico de neutrones. Esa tendencia se pone perfectamente de manifiesto en el caso del elemento 112 (copernicio, de símbolo Cn): en comparación con el Cn 277 (copernicio con 165 neutrones), que tiene una vida de tan solo 0,6 milisegundos, el Cn 285 (con un total de 173 neutrones) vive unas 50.000 veces más. Parece probable que la pauta se prolongue hacia el centro de la isla de estabilidad, aunque seguimos sin saber si existe algún elemento superpesado que sea indefinidamente estable.

La mera posibilidad, sin embargo, ha hecho que los científicos comiencen a buscar esos elementos en la naturaleza. El hecho de que no los hayamos observado en grandes cantidades no significa que no pueda haber trazas de ellos a plena vista. Podrían haberse formado junto con otros elementos más pesados que el hierro en procesos astrofísicos violentos, como las colisiones de estrellas de neutrones, y luego haberse diseminado por el universo. En ese caso, quizá se hallen presentes en los rayos cósmicos que llegan a nuestro planeta desde el espacio o hayan sobrevivido en el interior de las rocas en la Tierra. Al respecto se han efectuado muchas búsquedas con diferentes técnicas. Las predicciones indican que el elemento 110 (darmstadio) es bastante estable cuando contiene 184 neutrones (un número mágico), y cabe esperar que sea químicamente similar al platino, el metal situado justo encima de él en la tabla periódica. Los científicos han empleado técnicas como la fluorescencia de rayos X y la espectrometría de masas para detectar la presencia de darmstadio en minerales de platino existentes en la naturaleza, aunque por el momento no han tenido éxito. De estar ahí, su proporción ha de ser inferior a una parte en mil millones.

También se han rastreado indicios de elementos superpesados en los rayos cósmicos; por ejemplo, mediante el Experimento de Rayos Cósmicos Ultrapesados a bordo de la Instalación de Exposición de Larga Duración de la NASA, pero sin hallar pruebas concluyentes. No cabe duda de que estos esfuerzos proseguirán, pues un descubrimiento de este calibre revestiría una enorme importancia. Además, los nuevos elementos se traducirían en nuevos materiales, con propiedades únicas que podrían resultar útiles en todo tipo de aplicaciones.

FORJAR NUEVOS ELEMENTOS

Puesto que aún no hemos encontrado ningún elemento superpesado en la naturaleza, no queda otra opción que sintetizarlos en el laboratorio. La tarea consiste en enriquecer los núcleos atómicos de elementos «comunes» añadiendo más protones. Hasta cierto punto, esto se consigue imitando el proceso que sigue el universo para formar elementos pesados. Los núcleos que contienen demasiados neutrones son propensos a experimentar un proceso conocido como desintegración beta, por el que uno de esos neutrones «extra» se transforma en un protón, lo que aumenta el número atómico en una unidad. Podemos crear elementos hasta el fermio (elemento 100) bombardeando núcleos pesados con neutrones. Sin embargo, por ahora no se conocen núcleos de fermio —ni otros más pesados— que experimenten el proceso de desintegración beta, de modo que ahí termina esta vía.

Para ir más allá y crear elementos como el oganesón, el proceso consiste en acercar dos núcleos lo suficiente para que entre en juego la interacción nuclear fuerte. Esta, sin embargo, tiene un alcance sumamente corto, lo cual significa que los núcleos casi deben tocarse para notar su efecto. Y, para conseguir que se aproximen tanto, hemos de vencer la fuerza de repulsión electrostática entre los protones, lo que supone acelerar uno de los núcleos hasta un 10 por ciento de la velocidad de la luz y lanzarlo contra el otro. Dicha velocidad es justo la suficiente para superar la barrera de Coulomb, con lo que se produce un contacto entre las superficies de ambos núcleos; sin embargo, la probabilidad de que se toquen es ínfima. Además, cuantos más protones contenga el conjunto, más improbable será que los dos núcleos iniciales se amalgamen. Y, aun cuando se forme un «núcleo compuesto», este a menudo se descompondrá casi de inmediato en fragmentos más ligeros. Ambas tendencias (la baja probabilidad de que se forme un núcleo compuesto y la alta probabilidad de que se divida una vez formado) dificultan sobremanera la síntesis de elementos superpesados.

A pesar de estos desafíos, los investigadores han cosechado éxitos apasionantes con esta técnica. Los elementos 113, 115, 117 y 118, obtenidos a través de ella, recibieron sus denominaciones oficiales en 2016 (el organismo que tiene la potestad de reconocer y nombrar nuevos elementos es la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada, o IUPAC, por sus siglas en inglés). El elemento 113 se llama ahora nihonio en honor a Japón, donde se llevaron a cabo los experimentos para sintetizarlo. El elemento 115 es el moscovio, en referencia a la región de Moscú, sede del Instituto Conjunto de Investigación Nuclear, donde se descubrió. Y el 117 fue bautizado como teneso por el estado de Tennessee, donde el Laboratorio Nacional de Oak Ridge suministró los núcleos del elemento 97 (berkelio) que sirvieron como blanco en el proceso para obtenerlo. El oganesón, con sus 118 protones, cierra la lista de las últimas incorporaciones.

Aun cuando estos nuevos elementos se descomponen en un abrir y cerrar de ojos, hace poco que los investigadores han logrado mejorar la clase de experimentos que permiten examinar sus propiedades químicas

Lo más apremiante ahora es encontrar el elemento 119, el cual añadiría una nueva fila a la tabla periódica. Aunque varios equipos de investigación, incluido el nuestro, han perseguido estos números atómicos más altos, hasta el momento todos han fracasado a pesar de haber invertido semanas y meses en los aceleradores más potentes del mundo. Uno de los obstáculos se debe a que la exitosa ruta que llevó al oganesón (estrellar átomos de calcio contra núcleos más pesados) finaliza en el elemento 118, ya que no contamos con una cantidad suficiente de núcleos que contengan más de 98 protones para que sirvan de blanco. Ahora, los científicos están intentando identificar qué combinaciones de elementos conocidos y disponibles proporcionan las mejores oportunidades para generar nuevas especies.

QUÍMICA EXTRAÑA

Aun cuando estos nuevos elementos se descomponen en un abrir y cerrar de ojos, hace poco que los investigadores han logrado mejorar la clase de experimentos que permiten examinar sus propiedades químicas. Eso nos permite averiguar si, por ejemplo, se comportan como metales o como gases a temperatura ambiente.

El elemento más pesado cuyas propiedades químicas han podido estudiarse a fondo es el flerovio (con número atómico 114 y símbolo Fl). Su posición en la tabla periódica, debajo del plomo, implica que debería tratarse de un metal pesado típico. Sin embargo, algunas teorías que datan de 1975 sugieren que podría parecerse más a un gas noble; es decir, un gas prácticamente inerte que solo en muy contadas ocasiones reacciona con otros elementos o compuestos.

Esa extraña predicción se explica por la cantidad de protones que aloja su núcleo; es decir, por su carga eléctrica. En los elementos pesados, la elevada carga positiva del núcleo acelera los electrones que lo rodean hasta velocidades que pueden alcanzar el 80 por ciento de la velocidad de la luz. Eso hace que las diferencias de energía entre los orbitales electrónicos no sean como en los elementos más ligeros. En el flerovio, la brecha energética entre los niveles de energía asociados a sus dos orbitales más externos es mucho mayor que en los elementos similares pero más ligeros, como el plomo. En este último, la formación de un enlace químico aportaría con facilidad la energía que necesitan los electrones para salvar esa brecha. Sin embargo, puede que eso no ocurra tan fácilmente con el flerovio, por lo que este sería más reacio a experimentar reacciones químicas y se asemejaría más a un gas noble que a un metal.

No obstante, resulta difícil predecir con exactitud cómo se comportará el flerovio. Por lo general, las teorías coinciden en que debería ser más inerte que el plomo, aunque probablemente sea más reactivo que los verdaderos gases nobles y tal vez llegue a formar enlaces metálicos débiles con elementos como el oro. Y, puesto que no hemos logrado obtener una cantidad suficiente para observarlo a simple vista, nadie sabe qué aspecto tendrá. Algunas predicciones sugieren que presentaría un color blanco plateado o gris pálido y que sería sólido a temperatura ambiente.

Las intrigantes propiedades del flerovio han hecho que no se escatimen esfuerzos en investigarlo, pese a que apenas genera-

mos unos pocos átomos por día. Además, ni siquiera los isótopos del flerovio más longevos que se conocen tienen períodos de semidesintegración de más de uno o dos segundos. Una de las mejores instalaciones de las que disponemos para producir este elemento es el Separador de Transactínidos y Aparato de Química (TASCA, por sus siglas en inglés) del Centro GSI Helmholtz de Investigación de Iones Pesados, en Alemania. Allí disparamos un haz de iones de calcio 48 sobre una rueda giratoria cubierta de plutonio 244. Cuando se originan los átomos de flerovio, los imanes los dirigen hacia un sistema llamado Criomultidetector en Línea para Física y Química de Transactínidos (COMPACT, por sus siglas en inglés). Esta máquina consta de una disposición de detectores de silicio enfrentados entre sí y separados alrededor de medio milímetro, de modo que dan lugar a dos canales estrechos y rectangulares por los que fluye un gas que arrastra al flerovio. Los detectores están recubiertos por una capa de oro muy fina, lo que nos permite estudiar cómo reaccionan los átomos del nuevo elemento con el metal. El primer canal detector se mantiene a temperatura ambiente. El final del segundo, sin embargo, se enfría con nitrógeno líquido a menos de 160 grados Celsius bajo cero, ya que los enlaces débiles (como los que exhiben los gases nobles) solo podrán ligar los átomos de flerovio a temperaturas muy bajas. Si el flerovio actúa como un metal, se adsorberá al tomar contacto con el oro al principio del canal, más caliente. Por otro lado, los gases nobles interaccionan demasiado poco con el oro para unirse con él a temperatura ambiente. Por tanto, si el comportamiento del flerovio se parece más al de un gas noble, solo se unirá al oro —en caso de que lo haga— en la parte final del canal.

Cuando nuestro grupo usó este montaje, observamos dos átomos que se desintegraron en los detectores a temperatura ambiente, lo que sugería que el flerovio se unía y luego se descomponía rápidamente, más como un metal que como un gas noble. Sin embargo, en un experimento anterior, dirigido por un grupo del Instituto Paul Scherrer de Suiza y llevado a cabo en el Laboratorio Flerov de Reacciones Nucleares de Rusia, se observaron tres átomos. Y, si bien uno de ellos se desintegró en la primera parte del canal, los otros dos fueron hallados a temperaturas de unos 90 grados bajo cero. Los investigadores interpretaron este resultado como un indicio de que su comportamiento se acercaba más al de un gas noble. En la actualidad estamos analizando nuevos datos obtenidos en el GSI que esperamos esclarezcan las propiedades de este apasionante elemento.

AVANCES SUPERPESADOS

Hace poco, el equipo de uno de nosotros (Block) llevó a cabo los primeros experimentos de espectroscopía láser en otro elemento superpesado, el nobelio (de número atómico 102 y símbolo No). Los átomos se obtuvieron a una velocidad de unas pocas partículas por segundo bombardeando con átomos de calcio (20 protones) un blanco de plomo (82 protones). Luego se ralentizaron con argón gaseoso y se les sometió a disparos con pulsos láser. Si los pulsos tenían la energía adecuada, un electrón de nobelio los absorbía y escapaba del átomo. Variando la frecuencia de los pulsos fue posible medir con precisión la energía necesaria para arrancar un electrón del átomo de nobelio. Esta «energía de ionización» es una de las propiedades características de un elemento que se relacionan con su posición en la tabla periódica. Determina la probabilidad de que reaccione con otros y forme enlaces químicos.

Llevamos a cabo estos estudios con el isótopo No 254 (nobelio con 152 neutrones) y, hace poco, ampliamos el experimento a dos isótopos más, el No 252 y el No 253, con el fin de averiguar la manera en que el diferente contenido de neutrones modificaba las energías que los electrones son capaces de absorber. Los resultados nos indicarán cómo varían el tamaño y la forma de los núcleos de estos isótopos, ya que las distintas configuraciones de un núcleo, cargado positivamente, afectan al modo en que orbitan y se comportan los electrones.

Los científicos también se han dedicado a crear enlaces químicos entre elementos superpesados y átomos más modestos para estudiar cómo interaccionan entre sí las especies exóticas. Un ejemplo reciente lo hallamos en la síntesis de moléculas con seaborgio (elemento 106). En experimentos llevados a cabo en el Centro Nishina RIKEN para Ciencia Basada en Aceleradores, en Japón, el grupo de Düllmann dirigió un equipo que obtuvo átomos de un isótopo de seaborgio con un período de semidesintegración de unos 10 segundos. A continuación, añadieron monóxido de carbono (CO) a la cámara que contenía el elemento pesado y descubrieron que este se transformaba en un hexacarbonilo, un compuesto formado por seis moléculas de CO unidas a un átomo central de seaborgio.

Düllmann y sus colaboradores hallaron que, en esta situación, el seaborgio actúa de manera similar a sus homólogos más ligeros y corrientes, el wolframio y el molibdeno, que tienen el mismo número de electrones de valencia. En un experimento con seaborgio de dos semanas de duración, se observó que formaba el mismo tipo de compuesto con moléculas de CO que el molibdeno y el wolframio, y a velocidades similares. Los científicos ahora se afanan en comprobar cuál de los tres elementos crea los enlaces más estables con el CO. Las estimaciones efectuadas a finales de los años noventa apuntan al seaborgio, pero cálculos más recientes y avanzados predicen que serán más débiles que los enlaces con wolframio.

Estos ejemplos esbozan tan solo una pequeña muestra de los experimentos que se están llevando a cabo con elementos superpesados y de las muchas cuestiones pendientes que esperamos resolver. Si bien los miembros más recientes de la tabla periódica son ciertamente exóticos, los estudios experimentales proporcionan una información cada vez más directa acerca de cómo encajan en el sistema de aquellos elementos comunes que encontramos en nuestra vida cotidiana. Ya sean inestables o perduren en el tiempo —en caso de alcanzar el centro de la isla de estabilidad—, los elementos superpesados tienen mucho que enseñarnos sobre el funcionamiento de los ladrillos básicos de la química. IyC

PARA SABER MÁS

Special issue on superheavy elements. Dirigido por Christoph E. Düllmann et al. Número especial de *Nuclear Physics A*, vol. 944, diciembre de 2015.
Grupo de Química de Elementos Superpesados (SHE), Universidad Johannes Gutenberg de Maguncia, Centro GSI Helmholtz de Investigación de Iones Pesados e Instituto Helmholtz de Maguncia: **www.superheavies.de**
Publicaciones para el Separador de Productos de Reacción de Iones Pesados (SHIP) en GSI: **www.gsi.de/cok/forschung/nustarenna/mustarenna_division/she_physic/publications.htm**

EN NUESTRO ARCHIVO

Supermoléculas de superátomos. Ideas que cambian el mundo 2017. John Pavlus en *IyC*, febrero de 2017.


INEFICAZ
EFECTOS ADVERSOS
RECAÍDA
ÉXITO
RECAÍDA
EFECTOS ADVERSOS
INEFICAZ
ÉXITO
INEFICAZ
EFECTOS ADVERSOS
INEFICAZ
RECAÍDA
EFECTOS ADVERSOS

NEUROCIENCIA

TRATAMIENTOS BASADOS EN NEUROIMÁGENES

Las técnicas de imagen médica tal vez ayuden a encontrar los mejores tratamientos para la depresión y la adicción, y podrían incluso reorientar la educación

John Gabrieli

John Gabrieli es director del Centro de Técnicas de Imagen Anthinoul A. Martinos del Instituto de Neurociencia McGovern, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). También ocupa la cátedra Grover Hermann en el Programa de Ciencias de la Salud y Tecnología de la Universidad Harvard y el MIT.



TODOS LOS DÍAS, PERSONAS CON PROBLEMAS COMUNES DE SALUD MENTAL RECIBEN MEDICAción que no les ayudará. Dar con los tratamientos que funcionen en tales pacientes requiere un arduo proceso de prueba y error. Cada terapia que falla corre el riesgo de hacer que el paciente pierda la esperanza en un remedio.

La depresión ilustra dolorosamente lo que puede fallar. En general, entre la mitad y dos tercios de los diagnosticados con depresión no mejorarán con ningún tratamiento. Los protocolos de investigación destinados a la depresión consisten en ensayos clínicos que normalmente evalúan la efectividad general de un medicamento o de una psicoterapia según el beneficio promedio en un individuo. Pasan por alto, sin embargo, la amplia franja de resultados de los pacientes, que abarca desde la recuperación completa a la ineficacia absoluta. La evaluación de fármacos antidepresivos más multitudinaria y dilatada en el tiempo, llamada STAR*D, ilustra lo que puede pasar. Se trata de un estudio de los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU. (NIH), basado en miles de pacientes atendidos en numerosos centros de salud del país. En ella, todos los participantes recibieron un tratamiento farmacológico inicial, y alrededor de un tercio mostró mejoras considerables. Solo un cuarto de aquellos que no respondieron al primer tratamiento mejoró con el segundo. Tras la tercera o la cuarta prescripción farmacológica, el 70 por ciento de los pacientes mostró una mejoría sustancial, pero la mayoría tuvo que experimentar uno o más fracasos antes de encontrar el fármaco adecuado.

Los tratamientos incorrectos no solo prolongan el malestar; también desaniman a los pacientes en su búsqueda de ayuda. Los participantes de STAR*D sabían que podían acceder a otros tratamientos en la siguiente fase del estudio, pero a pesar de eso, muchos no lo hacen. Un número considerable abandonó el estudio después de recibir sin éxito el primer fármaco, cerca del 30 por ciento, después del segundo, y el 42 por ciento, tras el tercero. (El tratamiento conductual de la depresión basado en una forma de psicoterapia conocida como terapia cognitiva-conductual, o TCC, también resulta francamente positivo para cerca de la mitad de los afectados.)

La explicación de las dificultades que afrontan los psiquiatras está vinculada con las imprecisiones y los imperativos económicos que conlleva el desarrollo de fármacos. Dos personas diagnosticadas con el mismo trastorno mental pueden responder de maneras completamente distintas al mismo tratamiento farmacológico dada la incapacidad actual para determinar quién responderá a qué tratamiento. Además, las empresas farmacéuticas normalmente se dirigen al mercado más amplio posible, en vez de adaptar los tratamientos a grupos más pequeños de pacientes que exhiban una forma concreta de depresión o de otro trastorno psiquiátrico. Los responsables del desarrollo de fármacos carecen también de las herramientas para implementar un enfoque más preciso. Las técnicas de diagnóstico que permiten predecir si una persona mejorará con un tratamiento determinado no forman parte de la práctica médica ordinaria.

En los últimos años, varias técnicas de imagen cerebral, combinadas con complejos algoritmos de análisis de la actividad neural, han comenzado a poner de manifiesto diferencias cerebrales entre las personas. Tales desigualdades permiten predecir si un fármaco o una psicoterapia sacarán a un paciente de la depresión o aliviarán una ansiedad social grave. Las primeras versiones de estas técnicas de diagnóstico parecen también prometedoras para averiguar si un alcohólico recaerá; incluso han comenzado a identificar si un estudiante tendrá dificultades con la lectura o con las matemáticas.

El empleo de técnicas de imagen para adaptar los tratamientos representa una nueva forma de medicina personalizada, una estrategia que suele basarse en los rasgos genéticos del individuo. Sin duda, los genes pueden predisponer para sufrir una enfermedad mental. Pero, en una persona, el nexo que vincula un gen dado con un trastorno psiquiátrico común es mínimo. La experiencia (el ambiente) desempeña también un papel esencial a la hora de determinar los genes que se activan en el cerebro. Si bien las técnicas de imagen adolecen de limitaciones, se acercan a lo que está sucediendo en el cerebro debido a la acción combinada de los genes y la experiencia vital. Por el momento, pueden pronos-

EN SÍNTESIS

Existen pocos tratamientos eficaces contra las enfermedades mentales. Los fármacos y las psicoterapias disponibles sirven de ayuda a ciertas personas, pero no a otras. Los profesionales médicos precisan de mejores medios para personalizar el tratamiento en cada paciente.

Las técnicas de neuroimagen parecen prometedoras para predecir quién se beneficiará de una determinada terapia o tratamiento. Las diferencias en la actividad neural podrán algún día orientar el tratamiento antidepresivo más eficaz para un individuo o señalar qué alcohólico recaerá.

El mismo tipo de técnicas de diagnóstico podría ayudar a los educadores y a los estudiantes. Cierta modalidad de resonancia magnética, por ejemplo, ya ha predicho mejor que las pruebas comunes qué niños disléxicos mejorarían en la lectura.

PÁGINAS ANTERIORES: AMY MARTIN

ticar las perspectivas de un tratamiento con mayor precisión que la genética por sí sola. A medida que estas técnicas se vayan refinando, la amalgama de los análisis cerebrales y genéticos podrá un día ofrecer predicciones más precisas.

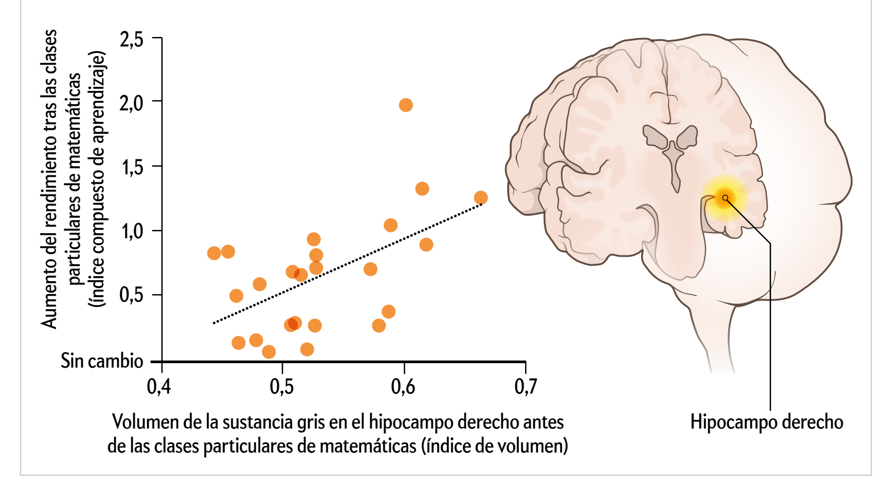
¿FUNCIONARÁ?

Un estudio que mi grupo del Instituto de Tecnología de Massachusetts realizó en colaboración con científicos clínicos de la Universidad de Boston y del Hospital General de Massachusetts demuestra la posibilidad de predecir si un tratamiento puede funcionar. Juntos estudiamos la respuesta a la TCC en pacientes con trastorno de ansiedad social. Este trastorno psiquiátrico, caracterizado por un miedo intenso a mantener contacto con el prójimo, es uno de los más comunes en EE.UU. Su forma aguda a menudo incapacita tanto a la persona afectada que no puede desempeñar un trabajo. En nuestro estudio, todos los pacientes recibieron terapia conductual. Queríamos averiguar si las medidas cerebrales tomadas antes del tratamiento podrían predecir quién se beneficiaría de la TCC.

TÉCNICAS DE IMAGEN Y EDUCACIÓN

Una mayor probabilidad de éxito

En un mundo ideal, los educadores sabrían qué estudiantes despuntarían más en cada programa educativo. Investigadores de la Universidad Stanford se propusieron ver si las técnicas de imagen podrían hacer posible este sueño. Introdujeron a 24 estudiantes de tercero de primaria en un imán de resonancia magnética antes de que recibieran clases particulares de matemáticas durante 8 semanas. Los estudiantes cuyas neuroimágenes mostraban un mayor volumen de tejido (sustancia gris) en el hipocampo derecho manifestaron un mayor rendimiento a raíz de las clases que aquellos con menos volumen en dicha región, que desempeña un papel esencial en la formación de los recuerdos nuevos.



Los pacientes visionaban caras con expresiones emocionales neutras o negativas (enfadadas) mientras nosotros registrábamos su respuesta mediante imágenes por resonancia magnética funcional (RMf), un tipo de exploración que mide los cambios en el riego sanguíneo del cerebro. Por otro lado, les hicimos una serie de preguntas para cuantificar la intensidad de su ansiedad. Los pacientes que ante las caras enfadadas mostraron una mayor respuesta en las regiones posteriores del cerebro (que procesan los rostros y otros objetos visuales) tenían más probabilidad de mejorar con la TCC. El uso de esta técnica de exploración cerebral aumentó más de tres veces la certeza en la predicción de quiénes se beneficiarían de la TCC, en comparación con las evaluaciones convencionales mediante cuestionarios.

Otro planteamiento que usamos para evaluar la efectividad de la TCC combinó dos técnicas. Una, conocida como imagen con tensores de difusión, evalúa lo bien que las conexiones establecidas por haces de fibras, o sustancia blanca, permiten a distintas regiones del cerebro comunicarse las unas con las otras. La sustancia blanca consta de haces formados por las largas prolongaciones de las neuronas llamadas axones, que están enfundadas en una vaina blanquecina y grasa conocida como mielina.

La segunda técnica evalúa qué conexiones cerebrales se establecen cuando una persona yace en reposo dentro del imán de RM. Con estos datos se ha trazado un mapa de redes cerebrales. A partir de él, el equipo creó una medida de diagnóstico, un bioindicador, que predecía cinco veces mejor los pacientes que se beneficiarían de la TCC. Otros estudios, tales como los de Greg Siegle, de la Universidad de Pittsburgh, han confirmado que una estrategia similar parece ser efectiva para determinar la manera en que los pacientes con depresión responden a la citada terapia.

Para predecir la respuesta a un fármaco destinado a tratar un trastorno psiquiátrico pueden combinarse las técnicas de imagen con pruebas psicológicas más convencionales. Andrea N. Goldstein-Piekarski, de la Universidad Stanford, y sus colaboradores examinaron las respuestas a medicamentos antidepresivos. Entrevistaron a pacientes sobre el estrés padecido en sus primeros años de vida y recurrieron a la RMf para evaluar la actividad de la amígdala, una región del cerebro que procesa las emociones. En el interior del imán, los pacientes miraban una serie de expresiones faciales felices. La combinación de la información sobre el estrés en la infancia y la respuesta de su amígdala a las caras daba pistas sobre si el individuo mejoraría con la medicación antidepresiva. Los estudios de Siegle y de Goldstein-Piekarski no compararon la psicoterapia con la medicación. Pero Helen Mayberg, de la Universidad Emory, ha mostrado que las neuroimágenes pueden revelar asimismo si un individuo deprimido tiene mayor probabilidad de responder a la psicoterapia que a la medicación.

PREDICCIÓN DE LA RECAÍDA

Los tratamientos contra el alcoholismo, la drogadicción, el tabaquismo y la obesidad comparten el objetivo de que el afectado se abstenga o reduzca el consumo de esas sustancias o de comida. Aquí, también, las técnicas de imagen pueden tener un papel en la predicción de quién recaerá en los hábitos adictivos. La mitad de los alcohólicos tratados vuelven a beber durante el año siguiente al tratamiento, índice de recaída que se constata similar con estimulantes como la cocaína.

Pocos datos permiten determinar el efecto de la extensión de los programas, tales como el ingreso durante 28 días en un centro de rehabilitación. Ninguna investigación ha demostrado aún si una terapia más corta o más larga sería más efectiva. Idealmente, los estudios podrían concretar si un paciente recaerá en los

FUENTE: «NEURAL PREDICTORS OF INDIVIDUAL DIFFERENCES IN RESPONSE TO MATH TUTORING IN PRIMARY-GRADE SCHOOL CHILDREN», POR KAUSTUBH SUPEKAR ET AL., EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 110, N.º 20, 14 DE MAYO DE 2013; FALCONIERI VISUALS (*cerebro*), JEN CHRISTIANSEN (*gráfica*)

próximos seis meses o en el plazo de un año, lo que permitiría adaptar la duración del programa a las necesidades de cada cual.

Los estudios de imagen que hacen predicciones sobre la efectividad de las terapias para el alcoholismo, la drogadicción o la obesidad no son tan comunes como los de la depresión. Pese a ello, algunos indican que los registros cerebrales pueden prever quién seguirá absteniéndose una vez que el tratamiento concluya. Un estudio de la Universidad de California en San Diego halló que las neuroimágenes tomadas después de un tratamiento contra el consumo de metanfetaminas permitían predecir quiénes recaerían durante los 12 meses siguientes.

En un estudio sobre la prevención de la obesidad mediante el empleo de RM, realizado por la Universidad de Alabama, se observó que las zonas cerebrales asociadas a la recompensa y el apetito (el núcleo accumbens, el cíngulo anterior y la ínsula) se activaban en un grupo de 25 personas obesas o con sobrepeso al ver imágenes de comida hipercalórica antes de iniciar un programa de asesoramiento de 12 semanas para adelgazar. La mayor activación de esas áreas se producía en quienes más difícilmente habrían perdido peso al acabar el programa. En ese momento, los participantes cuyas imágenes mostraban una gran activación de la ínsula y de otras áreas de procesamiento de la atención y la recompensa tenían más dificultades para seguir la dieta nueve meses más tarde.

Las técnicas de imagen pueden incluso ayudar a formular el tipo de mensajes que los profesionales sanitarios usan para fomentar los hábitos saludables en sus pacientes. Emily Frank, entonces en la Universidad de California en Los Ángeles, y sus colaboradores pidieron a los participantes de su estudio que aprendieran a usar correctamente la crema de protección solar para evitar las quemaduras y el cáncer de piel. Captaron imágenes de RMf mientras estos miraban diapositivas que prescribían medidas preventivas. Después, los participantes describían su actitud hacia las cremas protectoras y su intención de emplearlas después de proporcionarles un lote de ellas. Al cabo de una semana, el grupo recibió correos electrónicos en los que se les preguntaba si realmente las habían utilizado. Las personas que durante la sesión de visionado habían mostrado mayor actividad en la corteza prefrontal media, una región que regula las creencias y el sentido de la identidad, las emplearon más. Las neuroimágenes aportaron una medida objetiva de la efectividad del programa, más allá de la evaluación subjetiva individual de cuánto ayudó la información sanitaria.

La observación de la actividad cerebral también ayudaría a concretar el mejor método para dejar de fumar. Un artículo de la Escuela de Medicina de Harvard publicado en 2010 en *Biological Psychiatry* reveló que, en 21 mujeres, la respuesta intensa de la ínsula y la corteza dorsal del cíngulo anterior ante imágenes relacionadas con el tabaco permitía predecir la incapacidad de abandonar el hábito.

MEJORES ESTUDIANTES

La educación de los niños puede beneficiarse también de los estudios de neuroimagen para predecir dificultades en la lectura (dislexia) o con las matemáticas (discalculia). Los profesores y los padres tratan de ayudar, pero la educación se limita básicamente a esperar el fracaso. El alumno recibe alguna orientación del profesor hasta que llega el momento en que cunde el desánimo en él, y entonces el aprendizaje suele venirse abajo.

¿Qué pasaría si el apoyo educativo no solo reaccionara ante el fracaso, sino que antes planteara formas concretas de enseñanza que se adaptaran a las necesidades de cada alumno? Algunos descubrimientos recientes indican que las neuroimágenes pueden ayudar a predecir el rendimiento futuro del pupilo. De hecho, a veces pueden predecir mejor el rendimiento de un estudiante en el aula que otros baremos educativos y psicológicos ordinarios.

Los niños con dislexia manifiestan una amplia diversidad en su habilidad para compensar las dificultades lectoras a través de sus propias estrategias y ponerse así a la altura de sus compañeros. Junto con Fumiko Hoeft, ahora en la Universidad de California en San Francisco, observamos mediante RMf la respuesta cerebral a palabras impresas en disléxicos de unos 14 años, quienes también se sometieron a una batería de pruebas psicológicas. Después examinamos a los mismos jóvenes 30 meses más tarde para saber cuánto había mejorado su capacidad lectora: cerca de la mitad mostró una mejoría notable.

Ninguna de las pruebas educativas convencionales pudo pronosticar el progreso de su lectura, pero las neuroimágenes combinadas con una técnica analítica sí posibilitaron hacer predicciones fiables. El análisis por clasificación de patrones, que estudia los datos complejos de las RMf por medio de algoritmos de aprendizaje automático para macrodatos (*big data*), arrojó una precisión superior al 90 por ciento en la concreción de si un niño disléxico mejoraría su capacidad lectora o continuaría teniendo dificultades dos años después de la captura de las imágenes. Otros investigadores han publicado que las respuestas eléctricas captadas a través del cuero cabelludo (potenciales evocados) en niños de edad preescolar también predijeron las capacidades de lectura. Saber lo que deparará el futuro permite intervenir antes de que surjan los problemas de aprendizaje, una estrategia que libra a los niños del sentimiento de fracaso que provocan las dificultades iniciales.

La enseñanza de las matemáticas también puede mejorar. Un estudio llevado a cabo por Vinod Menon, de Stanford, descubrió que la anatomía cerebral permitiría saber si un estudiante de tercero de primaria tendría más posibilidades de beneficiarse de un programa de clases particulares de matemáticas que animaba a pasar de contar a memorizar hechos aritméticos (por ejemplo, memorizar $2 + 3 = 5$) como base para la resolución de problemas de aritmética. Las habituales pruebas conductuales destinadas a evaluar la aptitud matemática o el coeficiente intelectual no predijeron quiénes no sacarían provecho del programa, a diferencia de las medidas cerebrales. En concreto, el tamaño del hipocampo derecho, una región ligada a la memoria, apareció correlacionada con el progreso de los alumnos.

Estos estudios prometen sentar las bases de una metodología de aprendizaje personalizado basada en la neurociencia. Si estas investigaciones logran señalar el mejor enfoque didáctico para un estudiante, los educadores podrían evitar los fracasos que ocurren bien entrada la infancia o ya en la adolescencia, cuando las dificultades de aprendizaje son más difíciles de corregir.

SE BUSCAN MEJORES PREDICCIONES

Si las medidas cerebrales prometen predecir si un individuo responderá a un tratamiento de salud mental o a la educación, ¿por qué estos métodos no se usan todavía? Aún persisten algunos retos antes de que estas técnicas se adopten en los centros médicos y en las escuelas. Primero, las predicciones necesitan contar con más rigor estadístico. En los estudios que se han hecho por ahora, los modelos han relacionado la actividad cerebral con resultados ya conocidos, tales como el grado de mejora derivado de un tratamiento en un individuo. En este sentido, podrían considerarse «posdicciones», en lugar de predicciones.

Los nuevos trabajos deben verificar que estos descubrimientos permitan hacer predicciones precisas de forma sistemática.

Para que las ciencias de la predicción avancen en los campos de la salud mental y de la educación, la comunidad científica debe comenzar a diseñar estudios que comparen los resultados de dos grupos independientes. Un modelo matemático aplicado a un grupo puede ser ensayado en el otro para validarlo.

Un enfoque interesante conocido como «validación cruzada excluyente» descarta a un individuo de la evaluación global de los resultados del grupo. Los investigadores crean un modelo con los demás individuos del estudio para predecir un resultado de salud o educativo. Después, el modelo predice el resultado del individuo excluido. El proceso entero se repite para cada participante del estudio, y se crea así un modelo que guíe mejor la elección del tratamiento para cada nuevo paciente. En la actualidad, pocos estudios han conseguido aplicar ese enfoque, pero ese nivel de rigor es preciso para que las técnicas de imagen se conviertan en la práctica en una herramienta predictiva.

Otra barrera radica en el coste y la disponibilidad de la RM como técnica de exploración cerebral. Cualquier cálculo económico debe sopesar el precio del procedimiento, que suele rondar entre 500 y 1000 dólares por hora, con la alternativa de los honorarios médicos y el coste de las visitas hospitalarias, la pérdida de productividad laboral y los recursos de educación especial invertidos en los alumnos rezagados. En algunos casos, la RM podría remplazarse por otras técnicas, que incluso podrían tomar prestado el conocimiento cosechado por la técnica más cara. Así, por ejemplo, la electroencefalografía, que mide la actividad eléctrica del cerebro, podría adaptarse como sustituta de la RM en ciertas evaluaciones.

La promesa y la controversia que puede suscitar el uso clínico de la RM se hace patente en dos estudios recientes. Uno, a cargo de Joseph Piven de la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill, se valió de la RMf para registrar la imagen cerebral de 59 bebés de seis meses con el fin de detectar un riesgo elevado de trastorno del espectro autista (TEA). Las dificultades sociales y comunicativas que caracterizan al autismo no suelen aparecer en el momento de nacer, sino que suelen identificarse a los dos años con un examen minucioso. Los estudios de imagen de la actividad de las redes neuronales practicados a los seis meses predijeron el TEA en 11 bebés, trastorno que acabaría siendo diagnosticado unos 18 meses más tarde en 9 de ellos. También descartaron ese diagnóstico en los 48 bebés restantes analizados. Este tipo de predicción podría un día tanto serenar a los padres preocupados porque sus hijos puedan desarrollar el TEA, como asistir en el diseño de intervenciones precoces destinadas a los niños con alto riesgo.

Otro estudio predictivo intentó aprovechar el hecho de que la impulsividad es un claro factor de riesgo para la reincidencia delictiva. Una medida de la actividad cerebral sobre el autocontrol quizás ayudaría a abordar la escasa precisión de los peritajes de los expertos a la hora de decidir sobre fianzas, sentencias y libertad condicional. Kent Kiehl, profesor de psicología, neurociencia y derecho en la Universidad de Nuevo México, examinó la actividad cerebral durante una tarea de control de los impulsos en 96 delincuentes varones antes de su puesta en libertad y después los sometió a seguimiento varios años. Durante el registro de las neuroimágenes, los delincuentes ejecutaron una tarea concebida para dificultar el control de los impulsos. Tenían que apretar un botón cuando el carácter «X» apareciese de manera repetida en la pantalla del ordenador. Al mismo tiempo, tenían que resistir la tentación de apretar el botón en las raras ocasiones en que apareciese la letra «K», lo que creaba dos impulsos contradictorios, según lo que apareciera en la pantalla.

Los resultados ayudaron a predecir qué les sucedería a los probandos tras su puesta en libertad. La probabilidad de que un antiguo recluso volviera a ser detenido en los siguientes cuatro años se doblaba si la actividad de la corteza del cíngulo anterior había disminuido, región cerebral implicada en el control cognitivo y en la resolución de los impulsos contradictorios. Las neuroimágenes predijeron mejor la reincidencia futura que las medidas convencionales solas, tales como la puntuación en una tabla de psicopatía, la edad o la toxicomanía crónica. Un nuevo análisis inédito de los datos a cargo de Russ Poldrack, ahora en Stanford, indica que la fiabilidad de las predicciones disminuye notablemente cuando los resultados se aplican a la población penitenciaria de otras cárceles distintas a la estudiada (una aseveración parcialmente rebatida por Kiehl y sus colaboradores).

Todos estos estudios plantean un conjunto de cuestiones esenciales. ¿Cuán precisa debe ser una predicción para mejorar los tratamientos psiquiátricos y psicológicos y las prácticas educativas? Y como corolario: ¿cómo pueden las predicciones hechas a partir de neuroimágenes mejorar, y no reducir, las oportunidades educativas y laborales de las personas? Si pudiéramos prever mejor la salud mental futura, los problemas de aprendizaje o, incluso, las actividades delictivas, ¿de qué modo podríamos asegurar, como sociedad, que tales predicciones no justifiquen políticas punitivas, sino que promuevan el bienestar individual? Irónicamente, cuanto más mejore la capacidad predictiva con el tiempo, más necesario será un marco ético para que tal conocimiento se aplique con sabiduría.

PARA SABER MÁS

Dyslexia: A new synergy between education and cognitive neuroscience. John D. E. Gabrieli en *Science*, vol. 325, págs. 280-283, 17 de julio de 2009.

Toward clinically useful neuroimaging in depression treatment: Prognostic utility of subgenual cingulate activity for determining depression outcome in cognitive therapy across studies, scanners, and patient characteristics. Greg J. Siegle et al. en *Archives of General Psychiatry*, vol. 69, n.º 9, págs. 913-924, septiembre de 2012.

Prediction as a humanitarian and pragmatic contribution from human cognitive neuroscience. John D. E. Gabrieli et al. en *Neuron*, vol. 85, n.º 1, págs. 11-26, 7 de enero de 2015.

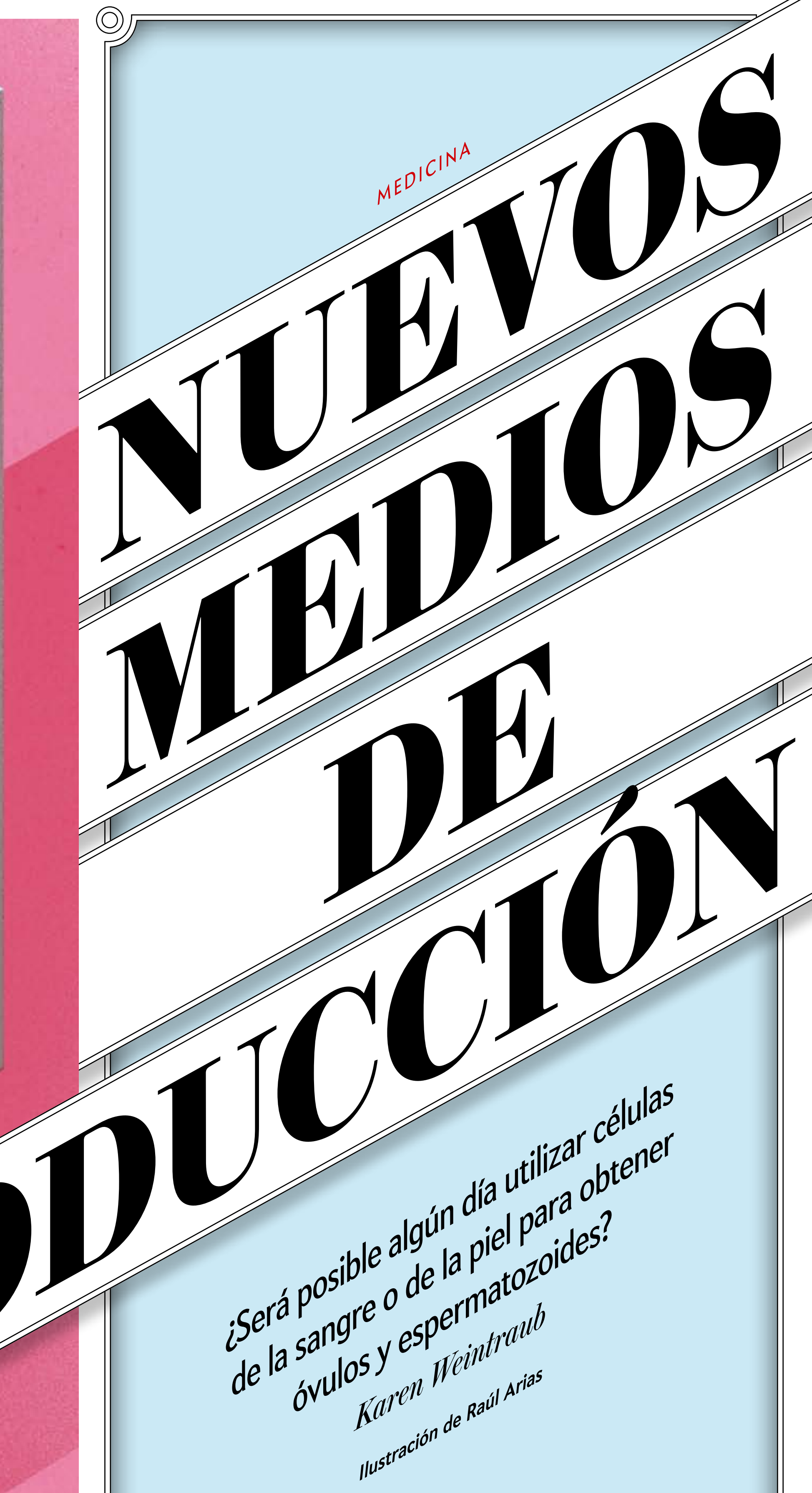
EN NUESTRO ARCHIVO

Técnicas para la estimulación del aprendizaje. Gary Stix en *IyC*, octubre de 2011.


R

MEDICINA

NUEVOS MEDIOS DE EPRODUCCIÓN



¿Será posible algún día utilizar células de la sangre o de la piel para obtener óvulos y espermatozoides?

Karen Weintraub

Ilustración de Raúl Arias

Karen Weintraub es periodista y escribe sobre salud y ciencia para el *New York Times*, *STAT* y *USA Today*, entre otros medios.



En apariencia, los ratones que corretean por la jaula del laboratorio de Katsuhiko Hayashi no tienen nada de particular: comen, duermen y retozan como los demás. Pero su origen es todo menos corriente, según reveló hace dos años en *Nature* el equipo de este especialista en reproducción de la Universidad de Kyushu: los ocho roedores pardos no provienen de la unión de un óvulo y un espermatozoide, sino que descienden, por línea materna, de una célula cutánea reprogramada.

El avance, calificado de «asombroso» por otros investigadores, viene a materializar una idea atisbada en 1997, cuando se consiguió clonar a la oveja *Dolly*. Aquella hazaña se basaba en experimentos de clonación anteriores, realizados con ranas, y nos enseñó que los animales poseen el mismo repertorio de instrucciones en cada una de sus células. Al transformar una célula mamaria de oveja en un animal vivo, los creadores de *Dolly* demostraron que todas las células de los mamíferos acogen los mismos genes y que la diferencia entre una célula de la mama y cualquier otra estriba en cuáles están activados y cuáles no.

A Hayashi y otros, aquel logro los llevó a plantearse que quizá sería posible reprogramar células de mamífero y reconvertirlas en cualquier otro tipo, desde una neurona hasta un óvulo, siempre que fuesen capaces de darles las instrucciones oportunas. Ahora, un selecto número de expertos de diversos lugares del mundo, entre ellos Hayashi, arrancan de esa base para estudiar la gametogénesis en condiciones in vitro: la creación de óvulos y espermatozoides a partir de células adultas.

Los especialistas en reproducción, además de algunas parejas que sufren problemas de esterilidad, siguen con sumo interés el trabajo de Hayashi, así como otros proyectos con roedores en los que se ha logrado reconvertir células madre (células precursoras capaces de devenir células especializadas) en espermatozoides rudimentarios. Si se consigue trasladar estas técnicas al ser humano, tal vez en el futuro podamos sustituir los gametos defectuosos por una célula de la sangre o de la piel. Así, un hombre podría ser padre aun careciendo de espermatozoides sanos, mientras que la mujer, en vez de ver menguada su fecundidad a medida que avanza la treintena, podría contar con abundantes óvulos sanos, casi a cualquier edad, con solo donar una muestra de sangre. Por otro lado, las parejas homosexuales podrían concebir hijos que guardasen parentesco biológico con ambos miembros.

EN SÍNTESIS

Todos los mamíferos requieren por norma un óvulo y un espermatozoide para procrear.

Hace poco se ha conseguido transformar células madre cutáneas de ratón en óvulos viables.

En 2016 se engendraron ocho ratoncitos sanos fecundando óvulos derivados de células madre cutáneas con espermatozoides normales.

Los científicos confían en que esos logros sirvan para ampliar en el futuro las soluciones a la esterilidad humana.

Pese a su atractivo, la posibilidad sigue siendo remota. Hace años que se suceden los experimentos con animales para dar con un sustituto de los óvulos y los espermatozoides, indispensables para engendrar un mamífero, pero los resultados todavía son insatisfactorios. Con todo, este estudio con ratones, por preliminar que sea, ya suscita toda una serie de interrogantes éticos sobre las aplicaciones que pueden derivarse para el ser humano.

REPRODUCCIÓN PROGRAMADA

Para que este proceso reproductivo funcionase en el ratón, el equipo de Hayashi tuvo que amalgamar varios descubrimientos precedentes. En 2010, intentaron por primera vez «reiniciar» las células y devolverlas a su estado primigenio, anterior a la adquisición de su identidad celular. Con ese fin recurrieron a la técnica ideada por Shinya Yamanaka, de la Universidad de Kioto, por la que recibió el Premio Nobel en 2012.

Primero, extrajeron de la cola de un ratón adulto células cutáneas. Luego les añadieron cuatro genes para devolverlas a su estado de células madre, con la facultad de diferenciarse y convertirse en diversos tipos celulares. A continuación, aplicaron los descubrimientos genéticos realizados a principios de los años dos mil por Azim Surani, biólogo del actual Instituto Gurdon de Cambridge, y su entonces colaborador Mitinori Saitou (ambos posteriormente mentores de Hayashi). Aquellos estudios, sumados a otros ensayos con células madre embrionarias derivadas de embriones de ratón, permitieron al equipo de Hayashi averiguar qué genes son precisos para transformar las células madre en células germinales primordiales, precursoras de los óvulos.

Pero había un problema: las células primordiales, que pueden engendrar los óvulos o los espermatozoides, poseen dos juegos de cromosomas como toda célula corriente de un animal. Para formar los gametos, que solo contienen un juego, deben dividirse dos veces consecutivas mediante el proceso de la meiosis. En las hembras, la primera división ocurre en el embrión, cuando la célula primordial emigra a las gónadas, y la segunda durante la ovulación, cuando el ovocito madura merced a distintas hormonas. Hayashi y sus colaboradores, después de crear las células germinales primordiales, las reimplantaron a una hembra de ratón para que acabasen el desarrollo en su organismo, rebasando lo que entonces era la frontera de la ciencia. En cambio, para crear óvulos viables in vitro, tendrían que desentrañar cada uno de los pasos de la maduración y recrearlos en el laboratorio.

La clave, descubrieron, era imitar la naturaleza con mayor fidelidad, para lo cual dedicaron varios años a refinar la disolución en la que cultivaban los ovocitos. Uno de los avances más

notables sobrevino cuando añadieron al medio células ováricas procedentes de fetos de ratón mientras las células maduraban en la placa de cultivo. Las hormonas liberadas por las células incorporadas generan un ambiente parecido al del ovario natural, por lo que las células se comportan como si se hallasen dentro del cuerpo. Además, alteraron la viscosidad del líquido para simular el entorno de la gónada femenina.

Cuando lograron el medio adecuado y los óvulos maduraron en el laboratorio, los pasos siguientes fueron los mismos que en cualquier proceso de fecundación in vitro (FIV). Primero, fecundaron los óvulos maduros con espermatozoides naturales. Al cabo de unos días, mediante una micropipeta seleccionaron un embrión apto y se lo implantaron a una hembra que lo gestaría durante 20 días. Por último, después de numerosos intentos fallidos culminados con abortos, embriones no implantados o el nacimiento de crías muertas, nació un ratoncito sano. Tras él, vinieron más.

El proceso dista de ser perfecto. De los cientos de células precursoras generadas por el equipo de Hayashi, solo 16 sobrevivieron las cinco semanas que requiere el óvulo murino para madurar, y cuando fecundaron con espermatozoides los óvulos creados en el laboratorio a partir de células cutáneas, solo un porcentaje ínfimo llegó a ser una cría de ratón (en comparación con el 62 por ciento de los ovocitos obtenidos de hembras adultas y fecundados in vitro). Sin embargo, con todo ello han demostrado que su método funciona. Las ocho crías crecieron sanas y con normalidad; incluso se aparearon y engendraron su propia prole, rebosante de vitalidad.

ESPERMATOZOIDE BUSCA ÓVULO

Muchas personas necesitan ayuda para procrear. En Estados Unidos son estériles más del 10 por ciento de los hombres y un porcentaje similar de las mujeres. Los tratamientos son complicados y muchas veces infructuosos. Para someterse a la FIV, la mujer debe recibir a lo largo de una o dos semanas una serie de inyecciones de hormonas que provocan la liberación de varios ovocitos; luego, algunos se fecundan en el laboratorio y se implantan uno o dos embriones. El coste, que no suele estar cubierto por las aseguradoras, asciende fácilmente a 20.000 dólares, y aun así fracasan cerca del 65 por ciento de los ciclos, muchas veces por la mala calidad de los ovocitos. Por otra parte, la FIV no sirve si la pareja no dispone de óvulos y espermatozoides sanos.

Es obvio por qué resulta atrayente la opción de concebir una criatura a partir de células de la sangre o la piel humanas. En vez de la punción ovárica para extraer los ovocitos, bastaría con un poco de sangre de la madre. (Hayashi afirma que, en las personas, sería más fácil obtener células de la sangre que de la piel; las extracciones son el pan de cada día en los centros sanitarios, pero podrían usarse ambos tipos.)

En el laboratorio, las células sanguíneas se convertirían en células madre y, a partir de ahí, con unos pasos más, en óvulos o en espermatozoides. A continuación, el óvulo artificial podría ser fecundado con espermatozoides naturales, o viceversa, para implantárselo a la mujer con el mismo método que se emplea en la FIV, y el hijo tendría la misma herencia genética que recibiría normalmente del padre y de la madre.

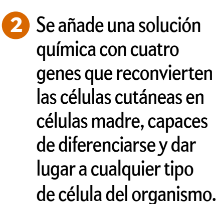
Hayashi advierte que la técnica aún no ha sido refinada para aplicarla en el ser humano y que solo podrá darse por válida si los óvulos cultivados producen embriones sanos con la misma frecuencia que los naturales. Primero deberá demostrarse que es posible mantener los óvulos vivos en el laboratorio el tiempo suficiente para emular el desarrollo humano (los óvulos del ratón

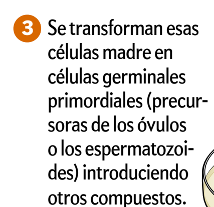
PASO A PASO

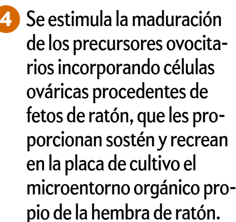
Engendrar hijos a partir de células cutáneas

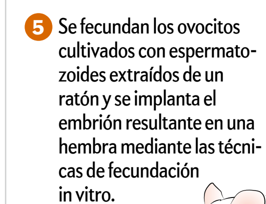
En busca de una solución para la esterilidad femenina, el equipo de Katsuhiko Hayashi, de la Universidad de Kyushu (Japón), pretende averiguar cómo convertir células cutáneas en óvulos viables. Tras miles de intentos fallidos, en el otoño de 2016 obtuvieron el medio químico adecuado y las condiciones propicias para reprogramar células cutáneas de ratón y convertirlas en gametos viables. A continuación, utilizaron las técnicas de fecundación in vitro para fecundar los óvulos cultivados en el laboratorio con espermatozoides naturales. A raíz de esa proeza, han nacido ocho ratones sanos. Ahora esperan que el conocimiento adquirido sitúe a la ciencia más cerca de nuevas soluciones para el ser humano.

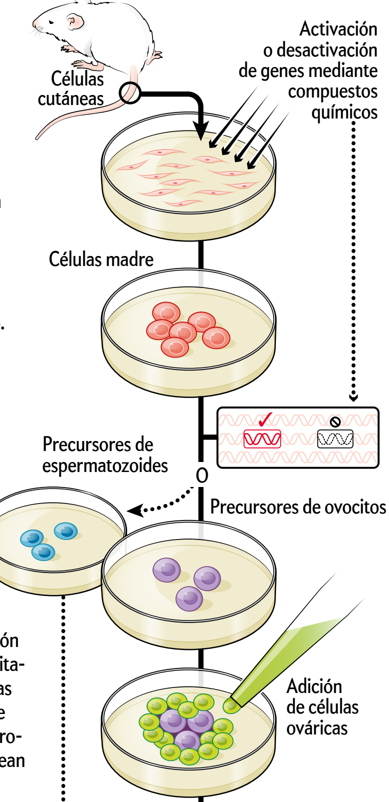
1 Se obtienen, mediante raspado, células cutáneas de la cola de un ratón donante.











TAMI TOLPA

maduran en cinco días, los de la mujer tardan 30). Aun así, antes siquiera de pensar en probarlo en un ser humano, los especialistas en reproducción tendrán que confirmar que el proceso funciona en animales grandes, más parecidos a las personas.

CRECER JUNTOS

A fin de superar ese inconveniente, Hayashi y su equipo están trabajando con primates —titíes—, aunque se han topado con obstáculos. Los ratones son buenos sujetos de investigación pues su ciclo ovulatorio abarca cinco días y su gestación dura 20. La gestación del tití, en cambio, supera los 140 días, así que el nacimiento de las crías se demora mucho más, aunque todo salga a la perfección. En este primate, las células germinales primordiales tardan mucho más en madurar y convertirse en ovocitos, y el equipo aún no ha logrado el entorno artificial que permita mantener las células con vida el tiempo necesario.

En su trabajo con los roedores, aprendieron a cultivar las células germinales primordiales fuera de los ratones vivos, pero tuvieron que añadir células ováricas obtenidas de fetos de ratón para que madurasen. En cambio, para que las células primordiales sobrevivan y maduren en los tities, y para ampliar esta técnica y cultivar muchos más óvulos in vitro, Hayashi estima que hará falta algo más que transferir células ováricas a la placa de cultivo: tendrá que determinar exactamente cuáles son las células ováricas que emiten las señales de la maduración y averiguar cómo fabricarlas a partir de células madre. Así, más adelante, podría cultivar todos los elementos necesarios sin verse obligado a extraer las células ováricas de otros fetos.

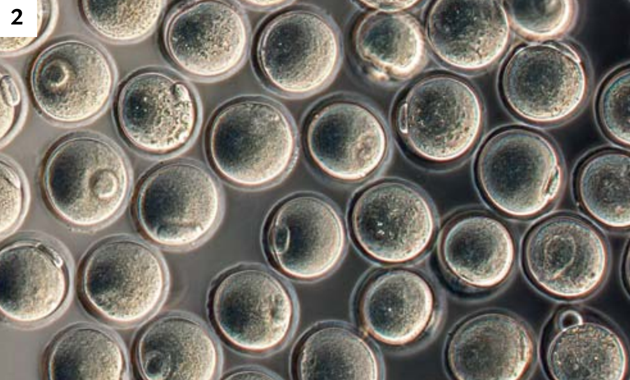
Azim Surani, director de investigaciones en epigenómica y línea germinal del Instituto Gurdon y pionero en el campo, ha experimentado con distintas combinaciones de estas células «cooperadoras», para propiciar la maduración y la comunicación de las células germinales. Surani explica que las células germinales «evolucionan hasta un punto y, a partir de ahí, necesitan algo muy concreto para pasar al siguiente estadio: requieren un cambio en el entorno o en las señales que reciben». Junto con su equipo están estudiando qué células son especialmente importantes en ese proceso, una tarea ardua y lenta. A fin de orientar los próximos pasos, están analizando las etapas de maduración de los ovocitos en fetos humanos que no han llegado a término. El laboratorio también ha comenzado a utilizar cerdos, en lugar de ratones, porque su desarrollo es más similar al humano y son más baratos que los monos.

En lugar de perfeccionar los protocolos de las placas de laboratorio, es posible que haya otra vía para avanzar. Algunos investigadores creen que obtendrán mejores resultados si implantan las células genomanipuladas en organismos vivos cuanto antes, para aprovechar los sistemas naturales de control de calidad que eliminan los gametos defectuosos y permiten destinar más recursos para los demás. Renee Reijo Pera, especialista en células madre de la Universidad Estatal de Montana, ha optado por seguir esa estrategia en su trabajo con espermatozoides. Explica que, en la naturaleza, solo los espermatozoides más vigorosos sobreviven para fecundar el óvulo, pero con la fabricación y maduración in vitro esa competencia desaparece, con lo cual aumenta el riesgo de que la concepción sea consumada por espermatozoides defectuosos. Como el cuerpo humano está soberbiamente preparado para expurgar el esperma de mala calidad, su trabajo se centra en producir espermatocitos primordiales que puedan madurar en los testículos, y añade: «Creemos que debería ser el organismo el encargado de hacer la selección; en la placa, me preocupa que forcemos fenómenos que no tendrían lugar en la naturaleza».

Algunos detractores opinan que, por muchas precauciones que se tomen, jamás debería engendrarse vida humana con óvulos o espermatozoides artificiales. Marcy Darnovsky, por ejemplo, cree que las células germinales generadas in vitro nunca serán lo bastante inocuas para justificar los riesgos. Darnovsky es la directora ejecutiva del Centro de Genética y Sociedad, entidad sin ánimo de lucro que aboga por el uso responsable de las genotecnologías en el ser humano. Se declara totalmente partidaria de las investigaciones que permitan conocer mejor el desarrollo de las personas y de los animales, pero rechaza la posibilidad de emplear óvulos y espermatozoides genomanipulados para concebir vidas, sobre todo si son humanas. «El riesgo biológico para cualquier niño concebido con técnicas de genomanipulación siempre será demasiado alto», señala, citando el ejemplo de la clonación de mamíferos: muchos embriones clonados no prosperaron y algunos animales han nacido con trastornos gravísimos. Considera que habrá que legislar para impedir que los progresos científicos de Hayashi, Surani, Reijo Pera y demás investigadores no vayan demasiado lejos.

Otros temores surgen en torno a la forma de entender la paternidad y el cambio radical que esas técnicas pueden dar a la cuestión. Por ejemplo, si es posible manipular las células de cualquier persona para reconvertirlas en óvulos o en espermatozoides, ¿podemos presagiar un futuro en el que ya no haya madres ni padres, sino uniprogenitores? ¿O sería posible apropiarse de una célula cutánea cualquiera, desprendida en una servilleta o en una sábana, para engendrar descendencia de su propietario sin su conocimiento y su consentimiento? Además, tal como escribieron el año pasado en *Science Translational Medicine* el decano de la Escuela de Medicina de Harvard,





RATONES SANOS concebidos con óvulos cultivados en el laboratorio y espermatozoides normales (*1*). Óvulos derivados de células madre embrionarias (*2*).

KATSUHIKO HAYASHI, UNIVERSIDAD DE KYUSHU; DE: «MOUSE EGGS MADE FROM SKIN CELLS IN A DISH», POR DAVID CYRANOSKI, EN *NATURE*, VOL. 538, 20 DE OCTUBRE DE 2016

George Daley, y sus colaboradores, sería factible fabricar embriones a una escala hasta ahora inimaginable, un hecho que conjuraría el fantasma de la devaluación de la vida humana y provocaría enormes dificultades de tipo normativo.

Por ahora, las objeciones éticas han limitado los estudios sobre la gametogénesis humana in vitro y han reducido al mínimo la financiación para dichos proyectos, argumentan los investigadores. Hace tiempo que en los Estados Unidos está restringida la investigación con embriones. Si bien el Gobierno de Obama se mostró más partidario de investigar con células madre que su antecesor, muchos prevén que la situación cambiará de nuevo con la presidencia de Donald Trump. También en otros países, la ausencia de financiación y la dificultad para obtener muestras de embriones naturales complican todavía más las investigaciones, aseveran Surani y Helen Picton, quien trabaja en el mismo campo en la Universidad de Leeds. Hayashi confiesa que le resultaría muy difícil realizar estudios sobre líneas germinales humanas en su patria, Japón (cuya legislación prohíbe fecundar células germinales humanas, ni siquiera con fines científicos), mientras que Jacob Hanna, del Instituto Weizmann de Ciencias, asegura que allí las cosas son más fáciles, dado el interés cultural de su país por los avances reproductivos.

DILEMA ÉTICO

Los defensores aducen que, aunque nunca se llegue a engendrar un bebé humano, perseguir el objetivo de fabricar óvulos y espermatozoides ya será beneficioso: para el tratamiento de la infertilidad, para comprender mejor las primeras fases del desarrollo y para conocer el efecto de las toxinas en la herencia humana. Picton, especializada en fisiología ovárica y reproducción, lo describe como «un viaje de descubrimiento». Saber cómo discernir los gametos de buena calidad, por ejemplo, serviría para mejorar los protocolos de selección en la FIV, mientras que perfeccionando la receta para crearlos quizá consigamos detectar el punto exacto en que se tuerce el desarrollo celular y aparecen las enfermedades y malformaciones o la célula muere.

Aprender a fabricar óvulos y espermatozoides a partir de células cutáneas o sanguíneas también puede ayudar a comprender cómo opera la herencia epigenética, es decir, los cambios heredables que no se producen en los genes, sino en la expresión génica. Examinando cómo se forman los ovocitos y los espermatocitos, desde sus primerísimas fases, pueden hallarse grupos metilo y otras modificaciones que se hayan acumulado en los genes. En la actualidad hay abiertos muchos interrogantes sobre los rasgos que parecen heredarse sin que se vea alterado el genoma. En un estudio de 2016, por ejemplo, se observaron cambios epigenéticos en áreas de los genes asociados con las hormonas del estrés, en los hijos de supervivientes del Holocausto que nacieron años después del trauma sufrido por sus padres. La secuencia génica no estaba modificada, pero sí habían heredado el modo de proceder de esos genes. Según Surani, generar óvulos y espermatozoides a partir de células madre permitiría ahondar en los fenómenos epigenéticos y arrojaría luz sobre la etiopatogenia de las enfermedades del envejecimiento, muchas de ellas causadas por la acumulación de marcadores epigenéticos. Incluso podrían diseñarse tratamientos contra tales enfermedades, si se consigue averiguar cómo se borran esas marcas en la célula germinal inmadura.

En este momento, Azim Surani está estudiando cómo se comportan las mitocondrias (los orgánulos que suministran parte de la energía a la célula) durante la formación del gameto femenino. Durante la concepción, las mitocondrias son objeto de una selección, pues el futuro hijo heredará exclusivamente el material genético mitocondrial de la madre. Surani confía en que, estudiando cómo se corrigen los errores mitocondriales en la célula germinal, un aspecto poco conocido, aprenderán mucho sobre la generación de la energía celular y las enfermedades relacionadas: «Por el camino, podemos adquirir conocimientos de enorme utilidad para mejorar la salud de las personas», asegura.

Por su parte, Katsuhiko Hayashi espera que su trabajo también sirva para salvar y recuperar especies al borde de la extinción, como el rinoceronte blanco. Sostiene que, conociendo con precisión la gametogénesis, estaremos más preparados para trabajar con tales especies. Actualmente está intentando reproducir lo logrado en ratones con células de rinoceronte blanco, pero el avance es lento. Además de las grandes diferencias en los mecanismos reproductivos, el tiempo de espera es muy superior: la gestación del ratón dura 20 días, la del rinoceronte 16 meses, aclara Hayashi.

Cuando expone en congresos su trabajo con los rinocerontes, el público se muestra entusiasmado, pero si menciona la posibilidad de trasladar esas investigaciones a los seres humanos, «algunas personas manifiestan mucho escepticismo y otras, mucho miedo», relata Hayashi, quien asegura comprender esa inquietud. Habría que desechar gran cantidad de células germinales y de embriones antes de poder transformar las células madre humanas en óvulos o espermatozoides viables, e incluso estos gametos correrían el riesgo de ocultar defectos congénitos, advierte.

Reijo Pera cree que la ética sí permite estudiar estas técnicas para aplicarlas con personas e incluso utilizarlas para procrear, siempre que estén mínimamente exentas de riesgos. Para esta especialista, ella misma estéril a raíz de un cáncer, ayudar a las parejas a tener hijos es razón suficiente.

Sea como sea, sigue habiendo cuestiones espinosas sobre qué puede considerarse exento de riesgo y quién debe valorarlo. Cuando surgieron otras técnicas polémicas, como la fecundación in vitro y el sistema de edición genética CRISPR, hubo reuniones formales entre investigadores, especialistas en bioética y el público para elaborar consejos y directrices sobre las posibles aplicaciones. Probablemente hará falta lo mismo con la gametogénesis in vitro, apuntan los investigadores y los bioéticos. Es más, esos debates deberían tener lugar mucho antes de que las técnicas estén listas para los seres humanos. En su artículo de enero de 2017, el equipo de Daley escribe: «Antes de lo inevitable, la sociedad debería entablar y mantener un debate público sobre los problemas éticos [de la gametogénesis in vitro]. Con el avance vertiginoso de la ciencia es muy posible que la medicina reproductiva y regenerativa nos deparen más de una sorpresa». IyC

PARA SABER MÁS

Derivation of oocytes from mouse embryonic stem cells. Karin Hübner et al. en *Science*, vol. 300, págs. 1251-1256, 23 de mayo de 2003.

Offspring from oocytes derived from in vitro primordial germ cell-like cells in mice. Katsuhiko Hayashi et al. en *Science*, vol. 338, págs. 971-975, 16 de noviembre de 2012.

Reconstitution in vitro of the entire cycle of the mouse female germ line. Orie Hikabe et al. en *Nature*, vol. 539, págs. 299-303, 10 de noviembre de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Una década de reprogramación celular. Megan Scudellari en *IyC*, octubre de 2016.

Edición genética en embriones humanos. Nerges Winblad y Fredrik Lanner en *IyC*, octubre de 2017.

EL TRIBALISMO DE LA VERDAD

A medida que la polarización política se agudiza, los argumentos que esgrimimos ante los demás podrían estar cambiando nuestra comprensión de la verdad misma

Matthew Fisher, Joshua Knobe, Brent Strickland y Frank C. Keil

En un momento clave del debate final entre los candidatos presidenciales Trump y Clinton, el primero abordó una cuestión relacionada con el presidente ruso Vladimir Putin:

«No la respeta», espetó Trump señalando a Hillary Clinton. «A juzgar por todo lo que veo, Putin no tiene respeto por esta persona».

Acto seguido, ambos candidatos ahondaron en la materia para tratar de comprender mejor los matices de las peliagudas cuestiones políticas que trataban. Clinton afirmó:

«¿Está insinuando que el planteamiento contundente que propongo fracasaría a la hora de poner freno al expansionismo ruso?».

A lo que Trump respondió:

«No, coincido absolutamente en que pondría freno al expansionismo ruso; lo que ocurre es que también serviría para desestabilizar el...».

Es broma. Eso no es en absoluto lo que ocurrió. El verdadero objetivo de cada bando era atacar y derrotar al contendiente. Lo que Clinton dijo realmente fue:

«Bueno, eso es porque preferiría tener a una marioneta como presidente de Estados Unidos».

A lo que Trump replicó:

«¡Usted es la marioneta!».

EN SÍNTESIS

La existencia de una objetividad moral es una cuestión filosófica espinosa. Los científicos cognitivos han reunido pruebas empíricas para analizar las perspectivas de la gente corriente ante la dicotomía del relativismo frente a la verdad inmutable.

A medida que aumenta la polarización política, el debate para ganar parece estar ganando terreno al debate para aprender, sobre todo en los foros virtuales como Facebook y Twitter.

Los investigadores han hallado que el estilo discursivo adoptado por los individuos modifica su modo de comprender la cuestión debatida. Si proliferan los debates para ganar, es muy probable que el objetivismo también lo haga.

HANNA BARCZUK



Escenas como esta se han vuelto tan comunes en el discurso político actual que solemos olvidar lo muy distintas que son de las discusiones que solemos mantener en la vida cotidiana. Imaginemos a un par de amigos tratando de decidir a qué restaurante ir a cenar. Uno podría decir: «Podríamos probar el nuevo restaurante hindú. Hace meses que no tomo comida india». A lo que el otro respondería: «Pues he visto que no está recibiendo muy buenas críticas. ¿Y si mejor cenamos pizza?». «Viene bien saberlo. Pizza, entonces», diría el primero. Cada uno da su opinión. Entablan una conversación en la que cada cual expone su argumento, después escucha el del otro y ambos confluyen hacia un acuerdo. Los diálogos de ese tipo se dan sin cesar. En nuestras investigaciones, enmarcadas dentro de la psicología cognitiva y la filosofía experimental, nos referimos a ellos como «discutir para aprender».

Pero a medida que se acentúa la polarización política en Estados Unidos, el debate con posturas antagónicas, ejemplificado por el encuentro de Trump y Clinton, resulta cada vez más frecuente, no solo entre los cargos políticos, sino también entre la ciudadanía. En los encuentros de ese tipo, las personas argumentan su punto de vista, pero ninguno de ambos bandos muestra un interés genuino en aprender del otro. Antes al contrario, el verdadero objetivo consiste en «marcar puntos»; dicho de otro modo, en derrotar al contrincante como si todo fuera una competición. Las conversaciones en Twitter, Facebook e incluso las secciones de comentarios de YouTube se han convertido en un poderoso símbolo del carácter combativo del discurso político de nuestros días. Aludimos a ese tipo de diálogo como «discutir para ganar».

Las discrepancias ideológicas de los estadounidenses traen consigo cierta animosidad hacia los oponentes. Las últimas encuestas ponen de manifiesto que liberales y conservadores ya no suelen concordar tanto entre sí, mantienen opiniones desfavorables hacia el partido contrario y hasta llegarían a disgustarse si un familiar se casara con un miembro del otro bando. Simultáneamente, el auge de las redes sociales ha revolucionado el modo en que se consume la información; a menudo las noticias se ajustan de forma personalizada a las preferencias políticas de cada uno. Los puntos de vista del adversario pueden quedar totalmente fuera de la burbuja mediática creada por uno mismo. Para empeorar las cosas, en tales plataformas cualquier contenido que pueda suscitar indignación tiende a lograr mayor difusión, por lo que constituyen un caldo de cultivo idóneo para los titulares gancho y las noticias falsas. Muy probablemente, ese ambiente virtual de carácter tóxico divide cada vez más a los estadounidenses y es cuna de discusiones improductivas.

En estos tiempos de creciente tribalismo, se ha planteado una pregunta fundamental acerca del efecto psicológico del discutir para ganar: ¿qué le ocurre a la mente —y qué pasa por ella— cuando dialogamos con el único fin de vencer a nuestro oponente? En nuestro último trabajo hemos explorado la cuestión con métodos experimentales y hemos hallado que la distinción entre las diversas formas de debatir tiene una repercusión asombrosa. No solo condiciona nuestra concepción del debate y de nuestros oponentes, sino que influye notablemente en nuestro modo de comprender la materia que se trata.

¿SOMOS OBJETIVISTAS O RELATIVISTAS?

La cuestión de la objetividad moral y política es notoriamente espinosa y ha motivado desde hace siglos numerosas disquisiciones filosóficas. No obstante, el fondo de la cuestión es fácil de comprender si analizamos algunas conversaciones hipotéticas. Supongamos una discusión en torno a un problema sencillo de ciencias o matemáticas: dos amigas colaboran para resolverlo y se hallan debatiendo una solución.

María: La raíz cúbica de 2197 es 13.
Susana: No, la raíz cúbica de 2197 es 14.

Puede que los observadores de este desacuerdo ignoren la respuesta correcta. Pero tendrán la absoluta certeza de que solo existe una respuesta correcta. No se trata de una cuestión de opiniones: se da un hecho y quien sostenga una visión alternativa simplemente estará equivocado.

Pensemos ahora en una situación distinta. Supongamos que ambas amigas deciden hacer un receso para comer y comentan qué untar en sus panecillos:

María: El queso crema vegetariano está buenísimo.
Susana: ¡Qué va!, no está bueno para nada. Da asco.

En este caso, los observadores podrían adoptar otra actitud: aun si dos personas mantienen posturas contrarias, puede que ninguna de ellas sea incorrecta. No parece existir una verdad objetiva en torno a la cuestión.

Teniendo en cuenta lo anterior, pensemos en lo que ocurre cuando se debaten temas controvertidos relacionados con cuestiones políticas donde interviene la moral. Supongamos que, mientras nuestras dos amigas disfrutan de su almuerzo, entablan una acalorada discusión de índole política:

María: El aborto es inmoral y debería ser ilegal.
Susana: No, no tiene nada de malo y debería ser legal.

Nos planteamos cómo entender este tipo de debate. ¿Se asemeja a un problema matemático con una respuesta objetivamente correcta y quien diga lo contrario andará errado? ¿O se trata de un choque frontal de gustos, donde las personas pueden tener opiniones encontradas sin que ninguna de ellas sea incorrecta?

En los últimos años, el estudio de esta temática ha trascendido los dominios de la filosofía y abraza también la psicología y la ciencia cognitiva. En lugar de acudir a las intuiciones de filósofos profesionales, una serie de investigadores como nosotros ha comenzado a reunir pruebas empíricas para analizar la perspectiva de los individuos ante estas cuestiones. ¿Tendemos a pensar que los asuntos morales y políticos tienen respuestas objetivamente correctas? ¿O tenemos una visión más relativista?

La pasada década de investigación ha puesto de manifiesto la complejidad de la cuestión. Hay personas más objetivistas y otras más relativistas. Pese a parecer obvio, los estudios posteriores quisieron examinar las diferencias entre ambos perfiles. Cuando a los participantes se les preguntaba si estarían dispuestos a compartir techo con alguien de opinión contraria a la suya en cuestiones






Matthew Fisher es investigador posdoctoral en el Departamento de Ciencias Sociales y de la Decisión de la Universidad Carnegie Mellon. **Joshua Knobe** es profesor en la Universidad Yale, adscrito al programa de Ciencia Cognitiva y al Departamento de Filosofía. **Brent Strickland** es investigador especializado en ciencia cognitiva en el Instituto Jean Nicod de París. **Frank C. Keil** ocupa la cátedra Charles C. y Dorathea S. Dilley de Filosofía y es profesor de Lingüística y Ciencia Cognitiva en la Universidad Yale.

morales o políticas, los objetivistas eran más proclives a rechazarlo. Cuando se invitaba a los participantes a sentarse en una sala, los objetivistas tendían a situarse lejos de los de parecer opuesto. Como señaló en una ocasión el psicólogo Geoffrey P. Goodwin. de la Universidad de Pensilvania, los que mantienen un punto de vista objetivista tienden a manifestar más cerrazón.

¿A qué se debe ese hecho? Una posibilidad sencilla es que, si creemos que existe una respuesta objetivamente correcta, podemos concluir que quien sostenga lo contrario estará equivocado, por lo que no valdrá la pena escucharlo. Por tanto, la visión que se tiene de las verdades morales objetivas podría condicionar la forma en que el individuo interacciona con otras personas. Es esta una hipótesis plausible que merece mayor indagación en el futuro. Con todo, pensamos que la historia no acaba ahí: sospechamos que podría darse un efecto en la dirección opuesta. Quizás el problema no se limite a que la adopción de enfoques objetivistas condicione la interacción con los demás; tal vez las interacciones con los demás puedan, en realidad, condicionar el grado en que se adoptan posturas objetivistas.

GANAR O APRENDER

Con el fin de verificar nuestra teoría, llevamos a cabo un experimento en el que una serie de personas adultas mantenían conversaciones de carácter político por internet. Cada participante se registraba en una página web y daba a conocer su postura ante una serie de cuestiones polémicas, como el aborto y el derecho a la posesión de armas. Seguidamente, las personas de opiniones encontradas se emparejaban y comenzaban a dialogar sobre algún tema en que discreparan.

A la mitad de los participantes se les animó a discutir para ganar indicándoles que sería una charla competitiva cuyo objetivo era batir al interlocutor. El resultado coincidió con el tipo de comunicación que se observa a diario en las redes sociales. Como ejemplo, citamos la transcripción de una de las charlas:

P1: Creo al cien por cien que es elección de la mujer.
P2: El aborto debería estar prohibido porque detiene un corazón que late.
P1: El aborto depende de la ley del país donde vives.
P2: El corazón late a los 21 días: es un asesinato [sic]

A la otra mitad se le animó a discutir para aprender. Se le informó de que la charla tenía una finalidad cooperativa y que debía intentar aprender todo lo posible de su contendiente. Las conversaciones solían lucir un tono bastante distinto:

P3: Creo que el aborto es un derecho que deberían tener todas las mujeres. Entiendo que algunas personas quieran establecer ciertos condicionantes acerca del cuándo y el porqué, pero creo que debería poder practicarse por cualquier razón, antes de un momento concreto del embarazo (acordado por los médicos) para no causar daño a la madre.
P4: Yo creo que la vida comienza en el momento de la concepción (cuando el espermatozoide penetra en el óvulo), así que para mí el aborto equivale a un asesinato.
P3: Entiendo perfectamente ese punto de vista. Como biólogo, es obvio que la «vida» nace desde la primera división celular. Pero no creo que se encuentre en un estadio tan avanzado como para justificar la abolición del aborto.

No es de extrañar que obtuviéramos tales resultados a partir de los dos tipos de instrucciones. Pero ¿conllevarían los debates en sí mismos la adopción de diferentes perspectivas respecto a la verdadera naturaleza de la cuestión debatida? Al término de la conversación, preguntamos a los participantes si creían que existía una verdad objetiva sobre los temas que acababan de debatir. Asombrosamente, las discusiones, de 15 minutos de duración, hacían variar los puntos de vista de los participantes. Los individuos resultaron ser más objetivistas tras debatir para ganar que tras hacerlo para aprender. En otras palabras, el contexto social del diálogo modificaba de veras su opinión ante una pregunta tan filosófica como si existe una verdad objetiva.

Los resultados desembocan de forma natural en otra cuestión que va más allá de lo que puede abordarse mediante un estudio científico. ¿Cuál de los dos modos de discutir convendría adoptar ante temas políticos controvertidos? A primera vista, la respuesta parece inmediata. ¿Quién se negaría a reconocer que hay algo sumamente importante en el diálogo cooperativo y algo tan contraproducente en la pura competición?

Si bien esa simple respuesta puede ser cierta en la mayoría de las ocasiones, podrían darse casos no tan claros. Supongamos que mantenemos un debate con un grupo de escépticos del cambio climático. Podríamos tratar de sentarnos, escuchar sus argumentos y hacer lo posible por aprender de estos. Pero hay quien consideraría que ese enfoque es incorrecto. Puede que no tuviéramos nada que ganar mostrándonos abiertos a unas ideas que contradicen el consenso científico. De hecho, acceder a participar en un diálogo cooperativo podría ser un ejemplo de lo que los periodistas denominan un «falso equilibrio», en el que se legitimaría una postura atípica. Hay quien diría que, en estos casos, el mejor enfoque sería debatir para ganar.

Es evidente que nuestros estudios no pueden determinar directamente qué forma de debatir es «la mejor». Y si bien numerosas pruebas indican que el discurso político contemporáneo está adquiriendo un tono cada vez más combativo y se preocupa más de ganar, nuestros resultados no aclaran por qué se está produciendo dicho cambio. Más bien nos ofrecen una nueva información relevante que considerar: la modalidad de debate que adoptamos hace variar nuestra comprensión de la cuestión en sí. Cuanto más debatamos para ganar, más nos parecerá que existe una sola respuesta correcta y que las demás están equivocadas. En cambio, cuanto más debatamos para aprender, más pensaremos que no existe una verdad objetiva y que puede haber otras respuestas igualmente ciertas. Así que la próxima vez que decidamos cómo entrar en una discusión en Facebook sobre el tema polémico del día, debemos recordar que no solo estaremos determinando cómo interactuar con una persona que mantiene la postura opuesta. También estaremos tomando una decisión que condicionará el grado en que nosotros —y los demás— consideraremos que la cuestión en sí tiene o no una respuesta correcta. IyC

PARA SABER MÁS

Why are some moral beliefs perceived to be more objective than others? G. P. Goodwin y J. M. Darley en *Journal of Experimental Social Psychology*, vol. 48, n.º 1, págs. 250-256, enero de 2012.
The influence of social interaction on intuitions of objectivity and subjectivity. Matthew Fisher et al. en *Cognitive Science*, vol. 41, n.º 4, págs. 1119-1134, mayo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Filosofía experimental. Joshua Knobe en *IyC*, mayo de 2012.



UN COCODRILO nada en las aguas de Jardines de la Reina, archipiélago del sur de Cuba.



EVOLUCIÓN

LA TEMIBLE DENTELLADA DE LOS COCODRILOS

Estudios intrépidos sobre la fuerza de la mordedura de estos reptiles y sus parientes revelan secretos acerca del éxito evolutivo del grupo

Gregory M. Erickson

Gregory M. Erickson es profesor de anatomía y paleobiología de vertebrados en la Universidad Estatal de Florida, donde estudia la biomecánica de la alimentación y las tasas de crecimiento de especies vivas y extintas de reptiles.



Corría un tórrido día de verano en Darwin, Australia. A cuatro pasos de donde me hallaba yacía un macho adulto de cocodrilo de estuario —el mayor reptil del planeta— de más de cinco metros y casi media tonelada. Sus inquietantes ojos felinos no apartaban la mirada de mí, mientras elevaba rítmicamente el tronco para lanzar un fuerte resoplido a través de sus orificios nasales. En aquel instante, llegué a pensar que mis colaboradores y yo quizás estábamos llevando demasiado lejos aquella investigación. Había trabajado muchas veces con cocodrilos, pero jamás con uno de semejante talla. Con el cuerpo empapado en sudor, avancé con suma cautela, armado únicamente con un mango de PVC de algo más de un metro, rematado en su extremo por un aparato con el que pretendía medir la fuerza de la mordedura de aquella bestia.

Me acerqué por el costado hasta menos de un metro de su cabeza. Inquieto, abrió sus fauces, mostró su batería de 64 dientes aguzados y siseó, una clara advertencia de que no diera un paso más. Era el momento: con el mango firmemente empuñado, introduje hasta el fondo de sus fauces el aparato concebido para medir la fuerza de su dentellada. Las mandíbulas se cerraron de inmediato atenazando el artefacto con un sonido atronador, como el disparo de un cañón. El tirón casi me lo arranca de las manos. Luego, solo hubo silencio.

Afiné todos mis sentidos y recapitulé lo que acababa de ocurrir. El reptil permanecía inmóvil como una piedra, yo estaba sano y salvo y el equipo parecía intacto. Para mi regocijo, había quedado perfectamente encajado entre los dientes posteriores. «Buena dentellada», espeté a mi colega de la Universidad de Florida, Kent A. Vliet, que estaba a mi espalda sosteniendo el amplificador de carga que registró el resultado. «¿Qué fuerza ha medido?»

«¡Mil seiscientos setenta y ocho kilos!», contestó Kent. Los investigadores y un grupo de observadores quedaron sobrecogidos al oír la cifra, mientras yo sujetaba con firmeza el mango, a la espera de que el cocodrilo dejara ir el aparato. Conforme mis nervios se templaban, reparé en que acabábamos de medir la mordedura más potente jamás registrada en un ser vivo.

Aquella jornada abrasadora en Australia constituyó el punto álgido de una larga serie de estudios que, junto con mis colaboradores, hemos estado llevando a cabo durante 17 años para esclarecer la biomecánica de la alimentación en los cocodrilos, los gaviales, los aligátores y los caimanes, un orden de reptiles conocido por el nombre de crocodilios (*Crocodilia*). Estos han reinado como superdepredadores en los ecosistemas templados litorales de agua dulce y en los estuarios durante más de 85 millones de años. Hace tiempo que nos preguntamos qué factores son la clave de su éxito. Nuestros hallazgos no solo explican por qué los crocodilios modernos dominan hoy esos hábitats, sino que arrojan luz sobre cómo sus ancestros prehistóricos lograron dominar, en un inicio, las orillas de las aguas continentales.

DISEÑADOS PARA MATAR

El abundante registro fósil disponible sobre el orden muestra que, aparte de su cabeza, la morfología corporal ha permanecido prácticamente inalterada a lo largo de millones de años. El tamaño, en cambio, ha sufrido reiteradas modificaciones que han supuesto la aparición repetida de casos de enanismo (longitud inferior a 1,20 metros) y de gigantismo (longitud superior a 9 metros). Estas variaciones del tamaño se acompañaron de cambios en la forma del hocico y los dientes. Sin duda, la clave para entender gran parte del éxito del grupo reside en averiguar qué forma, función, eficacia y relevancia tienen esos atributos para la alimentación.

Como si el azar lo hubiera dispuesto así, las 24 especies vivientes de crocodilios, a semejanza de sus ancestros, presentan una gran diversidad de tallas, que van de 1,20 a 7 metros. El

EN SÍNTESIS

Los cocodrilos y sus parientes cercanos, integrantes del grupo de los crocodilios, han dominado los hábitats litorales desde hace decenas de millones de años.

Los estudios sobre la biomecánica de la alimentación de las especies vivas han arrojado luz sobre su éxito evolutivo.

Esta investigación también contribuye a ahondar en el conocimiento de los hábitos alimentarios de otros animales, como los dinosaurios.

PÁGINAS ANTERIORES: BERNARD RADVANER, GETTY IMAGES

hocico de los cocodrilos modernos exhibe la misma variedad de formas plasmada en el registro fósil. Ha sido posible vincular el tipo de alimentación con las distintas morfologías del hocico en los cocodrilos actuales. En concreto, se distinguen especies de hocico mediano y ancho de hábitos generalistas; otras de hocico delgado y dientes en forma de aguja que capturan presas pequeñas como los peces; un tercer grupo con hocico ancho y dientes bulbosos que devora presas duras como los moluscos; y por último, especies de morro más chato y hábitos de alimentación semiterrestres. El estudio de la biomecánica de la alimentación y de la composición de la dieta en la naturaleza podría revelarnos cómo viven hoy estos depredadores formidables y, además, abrirnos las puertas para entender su pasado.

Cuando iniciamos nuestras pesquisas, el conocimiento científico acerca de la relevancia biomecánica del hocico, del tipo de dentición y de diversos tamaños corporales de los cocodrilos solo se fundamentaba en especulaciones y modelos, con una base empírica casi nula. Varias razones explican tal escasez de datos. La supervivencia de muchos de los cocodrilos del planeta está seriamente amenazada por la sobrecaza, circunstancia que dificulta el acceso a estos reptiles. También son obvios los peligros que entraña su estudio. Por último, la tecnología para medir la fuerza de su mordedura y la presión ejercida por los dientes —dos mediciones básicas para caracterizar la biomecánica de la alimentación— no existía. Pero todo ello estaba a punto de cambiar.

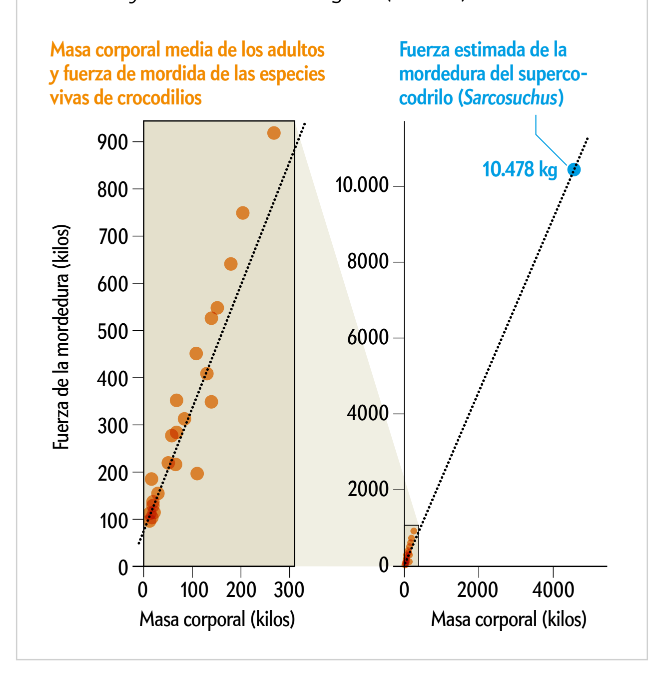
En 2001, un productor de documentales de *National Geographic* contactó conmigo para saber si estaría dispuesto a calcular la fuerza de la mordedura de *Sarcosuchus*, el «supercocodrilo» prehistórico de 12 metros, pariente de los cocodrilos actuales, descubierto en Níger por el paleontólogo Paul Sereno, de la Universidad de Chicago. Le contesté que esta podría deducirse a partir de experimentos con las especies vivas en que se registrara la fuerza de la dentellada, pero que antes debía cerciorarme de si sería posible acceder a los animales. De inmediato, llamé a Kent A. Vliet, especialista científico del Parque Zoológico y Granja de Caimanes de San Agustín (SAAF), en Florida (la única instalación en el mundo que albergaba las 23 especies de crocodilios conocidas por aquel entonces) y le propuse una serie de experimentos. Primero, quería estimar, recurriendo a los crocodilios del SAAF, la fuerza de la mordedura y la presión ejercida por la dentadura en ejemplares adultos de cada una de las especies actuales. A continuación, planeaba comparar los datos de los cocodrilos cautivos con los de ejemplares silvestres capturados por tramperos profesionales y biólogos de la Comisión para la Conservación de la Pesca y la Vida Silvestre en Florida. El objetivo era confirmar si los valores en cautividad podían servir para inferir los valores en estado salvaje. También me propuse realizar disecciones de músculos y experimentos de estimulación muscular en los aligátores. Mi intención era establecer un modelo de predicción de la fuerza de la mordedura en los ejemplares fósiles y tomar estos datos para estimar la capacidad de aprehensión en los crocodilios extintos y sus parientes, en especial, los dinosaurios. El propietario del SAAF, David Drysdale, nos concedió el permiso para llevar a cabo los experimentos; *National Geographic* aportó los fondos para la investigación, y el meollo de todo el asunto estribó en encontrar la mejor manera de recabar los datos antes de que la filmación diera comienzo.

¿Cómo se mide la fuerza del mordisco de un cocodrilo? Buena pregunta: no lo sabía. Nadie había medido antes de forma directa la fuerza de la dentellada de ningún animal de gran talla, y menos aún la de enormes reptiles carnívoros. Mi única

ANÁLISIS BIOMECÁNICO

Campeones del mordisco

Las especies de crocodilios exhiben una gran variedad de tamaños y hocicos. Los expertos habían predicho que las especies provistas de hocicos delgados ejercerían fuerzas de mordida menores que las dotadas de hocicos recios. Los estudios, empero, demuestran que todas ejercen la misma y sobrecogedora fuerza, en proporción a su talla. La estrecha relación existente entre la fuerza de la mordedura y el tamaño corporal (*izquierda*) ha permitido, además, estimar la potencia de la dentellada propia de especies fósiles, como la del supercocodrilo *Sarcosuchus*, pariente de los cocodrilos actuales y de 12 metros de longitud (*derecha*).



experiencia similar se remontaba a mi época de estudiante universitario en la que, para calcular la fuerza del mordisco de unas lagartijas diminutas, recurrí a una suerte de pinza improvisada con un par de láminas metálicas, provistas de unos indicadores que permitían calibrar la fuerza necesaria para cerrarlas. Para abordar este problema, mucho mayor, recluté a un ingeniero con el que había trabajado en la Universidad Stanford y a un ingeniero de diseño de Kistler, un fabricante de transductores de fuerza (medidores de la fuerza de compresión), empleados en los ensayos con materiales industriales. Juntos diseñamos unos aparatos portátiles y resistentes al agua destinados a medir la fuerza de la mordedura del cocodrilo. Su aspecto recuerda a una pequeña báscula de baño, pero resultan mucho más precisos y cuestan hasta 11.000 dólares (a menudo digo en broma a mis alumnos que pasen por mi despacho, si realmente quieren saber su peso). Acoplamos un mango de PVC a cada dispositivo y lo conectamos a un amplificador de carga portátil, con un sistema de lectura que registra al momento el resultado. También forramos las placas metálicas del transductor con gruesas capas de piel de toro para imitar el tacto de una verdadera presa y no dañar los dientes del saurio. Esta precaución resultó ser mucho

FUENTE: «INSIGHTS INTO THE ECOLOGY AND EVOLUTIONARY SUCCESS OF CROCODILIANS REVEALED THROUGH BITE-FORCE AND TOOTH-PRESSURE EXPERIMENTATION», POR GREGORY M. ERICKSON ET AL., EN *PLOS ONE*, VOL. 7, N.º 3, ART. N.º E31781; 14 DE MARZO DE 2012; JEN CHRISTIANSEN (*gráfica*)



EN UN ABRIR Y CERRAR DE DIENTES: Gregory M. Erickson, autor de este artículo, empeñado en medir la fuerza de la mordedura de un aligátor.

GREGORY M. ERICKSON

más importante de lo que pensamos en un inicio, ya que uno de mis colaboradores demostró más adelante que, al igual que una persona que come un caramelo duro y voluminoso, los reptiles no muerden con todas sus fuerzas si el objeto entre sus fauces es más duro de lo habitual.

Con nuestro artefacto bajo el brazo, el siguiente paso era elaborar un protocolo para los experimentos con los reptiles. Trabajé con nuestro biólogo experto en cocodrilos, Kent A. Vliet, y el director del SAAF, John Brueggen, en el diseño de un plan que cumpliera con nuestros objetivos de investigación y, al mismo tiempo, minimizara el estrés ocasionado a los cocodrilos de acuerdo con las directrices de bienestar animal. El plan que trazamos, que contra todo pronóstico rodó como la seda desde el principio, consistía en echar el lazo al cocodrilo en su cubil; luego, arrastrarlo afuera con la ayuda de un buen número de brazos; mantenerlo bien sujeto en su sitio; liberarle las mandíbulas, acción que lo obliga sin excepción a abrirlas; y, finalmente, introducir y colocar el medidor a la altura de los dientes posteriores (que son similares a los molares y ejercen la mayor fuerza) a fin de obtener y registrar la potencia máxima de la mordedura. Durante los experimentos, un adiestrador subido a lomos del animal debía mantenerle erguida la cabeza para evitar que rodara sobre sí mismo. Si conseguía dar vueltas durante la prueba, el aparato no solo mediría la potencia de la musculatura mandibular, sino que también registraría la masa y la inercia del cuerpo. No contentos con esto, también quisimos pesar y medir a los animales. El peso rara vez se registra en el caso de animales de gran tamaño no domesticados. Con todo, creímos que resultaba pertinente para nuestro trabajo, ya que nos permitiría comparar, en proporción con el peso del animal, la potencia de la mordida entre la gran variedad de tallas de los crocodilios, y cotejar los datos de estos reptiles con los de otros animales, con independencia de la morfología corporal.

La captura y el pesaje se pueden comparar con la monta de un toro en un rodeo, aunque en una ocasión mantuve una charla con un vaquero profesional que me confesó que no quería saber nada de una empresa de ese calibre, ya que «por lo menos, los toros no se revuelven para devorarte». De modo similar, una vez atrapé a un aligátor de 4 metros con la ayuda de Georges St. Pierre, considerado por muchos el mayor campeón de artes marciales mixtas de la historia, quien reconoció que aquello había sido lo más espeluznante que había hecho en su vida y no dudó en calificarnos a mis colaboradores y a mí como locos de atar. Siendo sincero, los que trabajamos en estrecho contacto con estos animales no los consideramos especialmente peligrosos. Aun así, los cocodrilos más grandes infunden gran respeto, y hasta los más pequeños pueden arrancarnos de cuajo un brazo si bajamos la guardia. Al igual que los veterinarios que tratan con perros, todos hemos aprendido a interpretar el comportamiento de los cocodrilos y a manipularlos sin daño; ni para ellos, ni para nosotros. La regla de oro es permanecer alejado de toda punta afilada y evitar la orilla del agua. Los cocodrilos son sumamente sigilosos —incluso los ejemplares de cinco metros consiguen pasar desapercibidos en pocos palmos de agua— y son capaces de salir repentinamente de ella para abalanzarse sobre uno.

Todavía nos quedaba por definir un último aspecto del protocolo de investigación. La fuerza de la mordedura se suele considerar un parámetro fiable para caracterizar la capacidad de aprehensión de un animal dentado. Pero es solo una medida indirecta. Una analogía sería la potencia de un motor: 700 caballos imprimen gran velocidad a un Ferrari, pero no a un camión volquete. Para nuestro propósito —valorar la capacidad del cocodrilo para atrapar las presas con las que se topa en el límite entre la tierra firme y el agua—, el parámetro más relevante desde el punto de vista biológico es la presión ejercida por las fauces. Esa presión es la que determina si los dientes podrán penetrar en los tejidos de la presa, sean estos piel y músculo, cutícula, concha, huesos o cualquier otro material. La presión ejercida por las coronas dentales contribuye a vencer la resistencia al cizallamiento en tales tejidos, por lo que se producen desgarros y heridas punzantes que se irán abriendo a medida que la fuerza de la mordida aumente, lo que comporta la muerte en el acto o un férreo agarre que acabará con la víctima hundida y ahogada.

Para medir la presión de los dientes en cada uno de los ensayos, la idea era colocar un tablón entre las mandíbulas y mantenerlas cerradas con cinta adhesiva. Entonces intervendría yo para hacer las impresiones de los dientes con masilla dental, una auténtica versión real del popular juego para niños «cocodrilo sacamuelas». El tablón impide que el cocodrilo intente asestar un mordisco de forma refleja en respuesta a la manipulación de los dientes o de cualquier parte de su boca. Pero incluso ahora, después de tomar decenas de impresiones, todavía me tiemblan las piernas durante la delicada operación; introducir la mano en esas fauces va en contra de todo instinto de conservación humano. La cuestión es que a partir de las impresiones se fabrican moldes dentales en el laboratorio y se calculan las áreas de contacto a nivel de la punta de los dientes. Luego, esos valores se dividen entre las fuerzas de la dentellada para deducir la presión dental ejercida.

Lo que aprendimos a lo largo de nuestros estudios con más de 500 ejemplares, que abarcaban todas las especies vivas del orden de los crocodilios, borra de un plumazo algunas de las ideas arraigadas en torno a estos reptiles. Antes de las investigaciones, los expertos habían predicho la existencia de dife-

rencias importantes entre las fuerzas de mordida relativas de los integrantes del orden. Los provistos de hocicos delgados y dientes aguzados que se alimentan de presas blandas, como los peces, tendrían una fuerza de mordida inferior, mientras que los dotados de cráneos macizos y recia dentadura, capaces de triturar huesos y moluscos, desplegarían una fuerza superior. En lugar de eso, los resultados señalan que todos los crocodilios generan una fuerza de tenaza extraordinaria. De hecho, nuestros análisis estadísticos revelaron que, a excepción del gavial del Ganges, piscívoro, todos los demás exhiben la misma fuerza, en proporción a su peso, con independencia de si su alimentación es blanda o dura o de si su hocico es delgado o robusto. Los valores máximos del intervalo registrado —hasta 1678 kilogramos— dejan en ridículo las mediciones o los cálculos obtenidos en los mamíferos carnívoros, como la hiena manchada, el león o el tigre (unos 450 kg). En cuanto a nosotros, el ser humano, apenas podemos generar unos 90 kg de fuerza. A menudo me preguntan si es posible zafarse de las fauces de un cocodrilo o de un caimán. La mordedura de un gran ejemplar equivale a dejar caer todo el peso de un automóvil sobre las mandíbulas. Así que si puede levantar uno, no tiene motivos para preocuparse.

El estudio de la biomecánica de la alimentación podría revelarnos cómo viven estos depredadores en la naturaleza y a entender su pasado

Resulta notorio que todos los biólogos expertos en cocodrilos con los que hablé antes de esta investigación opinaron que los caimanes silvestres —de dientes y garras «manchados de sangre» y en plena forma por la lucha que libran a diario por subsistir— harían alarde de una fuerza mucho mayor que sus iguales recluidos en cautividad, aletargados y, a menudo, obesos. Sin embargo, lo que observamos es que los dos muerden con la misma furia, en proporción a su talla. Este hallazgo encierra un gran valor porque confirmó que los datos obtenidos por nosotros en animales cautivos podían servir para inferir la fuerza de la mordida en ejemplares silvestres e, incluso, estimarla en los cocodrilos extintos.

A partir de estos datos, pudimos predecir la fuerza de la mordedura del supercocodrilo *Sarcosuchus* y de otros cocodrilos gigantes extintos. Los cálculos arrojan valores de unos 10.478 kg, peso similar al de un camión articulado. En el otro extremo de la balanza, estimamos también la fuerza de la mordedura del crocodilio más pequeño conocido, *Procaimanoidea*, que con sus 75 centímetros vivió hace unos 40 millones de años: su mordisco tendría una fuerza de apenas 65 kg. Paul M. Gignac, uno de mis antiguos alumnos que ahora ejerce como profesor adjunto en el Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Oklahoma, ha empleado hace poco estos datos para desentrañar la fuerza de la mordida a lo largo de la evolución de los crocodilios.

PODADORAS REPTILIANAS

Nuestros hallazgos comportan una serie de implicaciones evolutivas. La más notable es que demuestran que, a lo largo de su reinado de 85 millones de años como señores de los litorales de las aguas continentales, los cocodrilos han conservado la anatomía de la musculatura encargada de cerrar las mandíbulas. Los resultados también dibujan un nuevo escenario para la reiterada aparición en el el grupo de los mismos cinco tipos de hocico y dentición asociados a las distintas dietas. En cierta forma, son como podadoras: si uno quiere disponer de más potencia en sus labores de jardinería, escoge un modelo con un motor más grande. A lo largo de la evolución, los crocodilios lograron el mismo efecto con el desarrollo de cuerpos de mayor tamaño cada cierto tiempo. Para pasar de cortar hierba y malezas a tareas más complejas, como acondicionar las veredas o cortar las ramas de un árbol, hay que cambiar los accesorios. Del mismo modo, los crocodilios se especializaron para alimentarse de diversas presas gracias a la evolución de sus «accesorios»: sus mandíbulas y dientes.

Los datos sobre la presión ejercida por los dientes destapan una historia increíble. Al igual que la fuerza de la mordida, la presión de los dientes de los crocodilios no tiene parangón con ningún otro animal vivo y aumenta a medida que lo hace el tamaño del reptil. Los valores registrados oscilan entre 1417 y 25.217 kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), lo que deja por los suelos el récord anterior que ostentaba *Dunkleosteus*, un pez fósil gigante, con un peso estimado de 1499 kg/cm^2. Nuestros resultados indican que uno de los secretos que se esconden tras la variabilidad alimentaria que ha contribuido al gran éxito de los crocodilios (ninguno de ellos presenta en rigor una dieta especializada) es que cualquier especie puede alimentarse del tipo de presa que abunda en sus dominios. Las diversas morfologías dentales responden a la necesidad de ejercer más o menos presión en los cazadores más especializados, con lo que aumenta su capacidad para hincar el diente a las presas más blandas o resistir la dureza de los huesos y las conchas.

Con todo esto en mente, junto con mis estudiantes, comenzamos a examinar detenidamente los factores involucrados en la fuerza de la dentellada. En 2010, Gignac examinó la musculatura de los aligátores americanos para concebir una manera de predecir con precisión la contribución de cada músculo a la tarea. Todos los crocodilios cuentan con lo que a primera vista parece una musculatura cervical sumamente desarrollada. Se trata en concreto de los músculos pterigoideos mediales, que forman parte de la musculatura que permite cerrar la mandíbula o, técnicamente, ejercer el movimiento de aducción. En casi todos los animales, los pterigoideos mediales son pequeños y su contribución a la fuerza del mordisco es mínima. En los crocodilios, son los responsables de hasta el 60 por ciento de esa fuerza.

Los animales que carecen de una dentellada potente muestran de forma característica una musculatura temporal voluminosa, que se asienta sobre las mandíbulas (los músculos temporales son los que se vuelven visibles en las sienes cuando apretamos los dientes). En los cocodrilos, en cambio, los pterigoideos mediales han crecido de forma notable y sobresalen a los lados del cuello. ¿Por qué? La respuesta reside en su forma de cazar. En las aguas poco profundas, demuestran suma destreza

y sigilo en su acecho a las presas que merodean por la orilla. Por lo general, se acercan a la víctima elegida con la práctica totalidad de la cabeza y del cuerpo sumergidos, a excepción de las narinas para respirar, los ojos para ver y los oídos para escuchar. El resto de su inmenso cuerpo permanece oculto bajo las aguas hasta que se abalanzan sobre la presa desprevenida. El hecho de que los músculos aductores de la mandíbula permanezcan escondidos bajo la superficie del agua les permite ser mucho más discretos de lo que podrían serlo si hubiesen desarrollado el músculo temporal, pues su ubicación anatómica resulta mucho más visible. A semejanza de un submarino que navega a la profundidad de periscopio, el cocodrilo mantiene únicamente fuera del agua los sentidos imprescindibles; todo lo demás permanece sumergido.

Los análisis de Gignac sobre los músculos implicados en la fuerza de la mordedura de los cocodrilos permitieron encajar otra pieza del rompecabezas. En nuestros estudios iniciales, el gavial del Ganges, una especie de hocico delgado y dientes aguzados que se alimenta de peces, mostró una fuerza de mordida atípica, un 50 por ciento menor de lo habitual en los cocodrilios. Cuando Gignac diseccionó un ejemplar, observó que sus músculos pterigoideos mediales eran relativamente pequeños y, en cambio, la musculatura superior que cierra la mandíbula era más grande de lo habitual en los de su clase. Esta disposición acelera la velocidad de cierre en detrimento de la fuerza del mordisco. Sospechamos que el gavial, especie netamente piscívora entre todas, sacrificó parte de esa fuerza a cambio de una mayor rapidez para atrapar a los peces. Esta línea de investigación resuelve otro enigma que encierran los cocodrilos.

En el curso de nuestros experimentos con aquel enorme cocodrilo de estuario australiano, el reptil mantuvo atenazado el dispositivo de medición con sus fauces durante 10 minutos antes de soltarlo. La actividad del medidor durante ese lapso reveló episodios en los que apretaba la mandíbula con casi la misma fuerza que en la dentellada inicial. Yo mismo he llegado a registrar hasta 22 de tales episodios y, a veces, he tenido que aguardar 25 minutos para recuperar el equipo; consigues recobrar el aparato cuando el cocodrilo decide devolvértelo, ni un minuto antes. Este descubrimiento nos dejó pensativos acerca del significado de ese comportamiento y de cómo se producía.

Para averiguarlo, acoplamos un ordenador al aparato de medición y registramos las fuerzas sometiendo a la prueba a diversos aligátores americanos silvestres. Este proceder mostró que las fuerzas de sujeción equivalían a un 10 por ciento de la fuerza máxima de mordida. Nuestra hipótesis es que este comportamiento programado está vinculado con la forma en que los crocodilios hunden a las presas grandes. En la naturaleza, suelen valerse de una primera mordida enérgica para atenazar a la presa e impedir toda posibilidad de escapatoria. Luego la arrastran a aguas más profundas para ahogarla. Si la víctima forcejea, vuelven a apretar los dientes con todas sus fuerzas. Las disecciones practicadas por Gignac revelaron que esa escalofriante fuerza de agarre y sujeción es fruto de una extraordinaria especialización fisiológica de los músculos. Constató que la formidable musculatura aductora de la mandíbula, responsable de gran parte de la fuerza máxima del mordisco, es de color blanco, como se aprecia también en el músculo de la pechuga del pavo. En esta ave, es capaz de generar breves picos de fuerza precisos para alzar el vuelo que remiten con rapidez porque el riego sanguíneo resulta insuficiente. A continuación, Gignac describió la presencia de músculos oxidativos rojos y rosáceos implicados en el comportamiento de sujeción, que exige menos fuerza. Actuarían de forma análoga a la carne más oscura de las patas del pavo, provistas de una vascularización profusa y rica en mioglobina para posibilitar la marcha. El modelo de Gignac revela que, en conjunto, estos músculos de color oscuro no identificados hasta ese momento generan el 10 por ciento de la fuerza del mordisco del aligátor, la suficiente como para mantener los dientes cerrados.

T. REX ATACA DE NUEVO

Nuestra investigación contribuye a ampliar el conocimiento de los hábitos alimentarios de otros animales, además de los propios crocodilios. Desde entonces, junto con Gignac hemos recurrido a esos datos para poner a punto el primer modelo plausible con el que estimar la fuerza de la dentellada de *Tyrannosaurus rex*. Los cálculos anteriores se basaban, según el caso, en aligátores, lagartijas e, incluso, mamíferos. Huelga decir que los resultados son dispares y arrojan valores que rondan entre los 8200 y los 111.000 kg. En cambio, nuestro modelo, que es específico de los arcosaurios (el grupo que engloba a los crocodilios, las aves y sus parientes extintos), nos ofrece un valor cercano a los 3600 kg. Es decir, el doble de lo que el crocodilio vivo más grande del mundo es capaz de conseguir. Además, la presión de los dientes de *T. rex* , de 30.326 kg/cm^2, es la más grande que se haya calculado jamás en animal alguno. A raíz de estos nuevos cálculos, que publicamos en el año 2017, resolvimos el misterio, tal y como deja patente el registro fósil, de cómo el rey de los dinosaurios lograba hacer añicos los huesos de su víctima. Hoy en día, solo los mamíferos carnívoros cuyos dientes superiores e inferiores mantienen un contacto total, u oclusión, durante la masticación consiguen tal hazaña.

Los crocodilios son depredadores extraordinarios y hemos dado grandes pasos para dilucidar cómo han llegado a serlo, pero todavía quedan muchas incógnitas sin respuesta. Es probable, por ejemplo, que las distintas formas del hocico afecten a la fuerza del mordisco bajo el agua de modo muy distinto a lo que ocurre en tierra firme. Esto implica repetir los experimentos cambiando de medio. Es más fácil decirlo que hacerlo: proceder de esta guisa exige el diseño de nuevos dispositivos estancos que funcionen sumergidos, y se necesita colaborar con los ingenieros para averiguar de qué modo las corrientes de agua pueden modificar la velocidad de cierre de las mandíbulas y la fuerza del mordisco. Además, habrá que desarrollar nuevos protocolos de seguridad: el cocodrilo tiene todas las de ganar en el líquido elemento. Lo lograremos. Puede que luzcamos más canas y estemos más castigados por los sobresaltos y zarandeos recibidos desde que iniciamos esta investigación, pero empeño no falta. IyC

PARA SABER MÁS

Insights into the ecology and evolutionary success of crocodilians revealed through bite-force and tooth-pressure experimentation. Gregory M. Erickson et al. en *PLOS ONE*, vol. 7, n.º 3, art. e31781, 14 de marzo de 2012.
The biomechanics behind extreme osteophagy in *Tyrannosaurus rex*. Paul M. Gignac y Gregory M. Erickson en *Scientific Reports*, vol. 7, art. 2012, 17 de mayo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Evolución de los Crocodilios. Eric Buffetaut en *IyC*, diciembre de 1979.
Así vivía *Tyrannosaurus rex*. Gregory M. Erickson en *IyC*, noviembre de 1999.
La buchada perfecta. Jeremy A. Goldbogen en *IyC*, agosto de 2011

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting es exdirector del Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster.

La economía energética de la bicicleta

Ningún animal aprovecha la energía con tanta eficiencia como las personas cuando nos desplazamos... siempre y cuando lo hagamos sobre dos ruedas

Los orígenes de la bicicleta se remontan a la «máquina andante» de Karl von Drais, inventor alemán que, en 1817, concibió el precursor del hoy popular vehículo de transporte. Aquel ingenio carecía de propulsión a pedales, pero, aun así, ya avanzaba más rápido que los coches de caballos y mucho más de lo que es posible a pie. Con las bicicletas corrientes de hoy en día, un adulto medio puede viajar cuatro veces más rápido que caminando a buen ritmo. En otras palabras: las personas usamos nuestra energía muscular de manera mucho más eficiente cuando vamos en bicicleta.

Para investigar este medio de locomoción desde un punto de vista puramente físico y compararlo con otros, podemos comenzar considerando la potencia de un ciclista. Esta se obtiene al multiplicar su velocidad por la suma de las distintas fuerzas de resistencia que debe superar. Tales fuerzas se deben principalmente a la interacción con el suelo y con el aire circundante. El suelo hace que el ciclista experimente la llamada resistencia a la rodadura. Esta es en gran medida independiente de la velocidad y resulta proporcional al peso conjunto del ciclista y su vehículo. Dicha proporcionalidad se expresa a través de una constante que depende de la fricción entre el neumático y el pavimento: el coeficiente de rozamiento. No podemos cambiar la superficie de la carretera, pero sí reducir bastante el rozamiento si elegimos las ruedas adecuadas.

Como el rozamiento por rodadura también resulta proporcional al peso, cuanto menor sea la masa del ciclista, menos esfuerzo tendrá que hacer. Además, eso también le favorecerá en las subidas, dado que en ellas hay una componente del peso que se opone al movimiento. Sin duda, el empleo de materiales ligeros en la fabricación del vehículo también ayudará. Pero, dado que quien más contribuye a la masa total es el propio ciclista, una estrategia mucho más ventajosa consiste en montar en bicicleta más a menudo y adelgazar con ello. Solo en el ciclismo profesional, donde cuentan las décimas de segundo, vale la pena asumir el coste que supone recurrir

AERODINÁMICA SOBRE DOS RUEDAS: La resistencia aerodinámica constituye uno de los principales obstáculos que debemos vencer como ciclistas. Al adoptar la posición de carrera (*izquierda*), ofrecemos una menor superficie frontal al aire y este circula mejor alrededor de nuestro cuerpo que si nos sentamos erguidos (*derecha*). Sin embargo, las ventajas aerodinámicas se obtienen a expensas de la comodidad.





a la tecnología para eliminar cada gramo superfluo del velocípedo.

En la magnitud constante de la fuerza de rozamiento por rodadura incluimos —por lo general, tácitamente— las pérdidas por rozamiento que se producen al transferir la energía muscular a la rueda motriz, dado que esta cantidad tampoco depende apenas de la velocidad. En cualquier caso, las pérdidas en las bielas, la cadena y los rodamientos de las bicicletas modernas son relativamente pequeñas, siendo el rendimiento de entre el 90 y el 95 por ciento. Esto debemos agradecérselo sobre todo a los rodamientos de bolas, los cuales reemplazan el deslizamiento, que produce grandes pérdidas y desgaste, por la rodadura, lo que nos permite ahorrar energía. Su invención a mediados del siglo XIX dio un notable empujón al desarrollo de la bicicleta.

Si el rozamiento por rodadura fuera la única resistencia que hubiera que vencer, podríamos alcanzar velocidades vertiginosas. No en vano, el neerlandés Fred Rompelberg, provisto de una bicicleta especial y protegido del viento por un coche de carreras, consiguió alcanzar en los años noventa del siglo pasado la pasmosa velocidad de 268,8 kilómetros por hora. Un valor típico para la fuerza de rozamiento por rodadura en una bicicleta es de unos 5 newtons. Tomando como buena esta cifra, Rompelberg habría transferido a la bicicleta una potencia máxima de unos 370 vatios. Sin embargo, en condiciones normales eso solo permitiría alcanzar unos 40 kilómetros por hora. La diferencia se debe al rozamiento con el aire, que domina claramente a velocidades elevadas. En concreto, la fuerza de resistencia aerodinámica es proporcional al cuadrado de la velocidad, de modo que, si las demás condiciones permanecen constantes, su valor se multiplica por cuatro al doblar la velocidad.

Postura óptima

La fuerza de resistencia aerodinámica es también proporcional a la densidad del aire y a la superficie frontal de la bicicleta y el ciclista. Una constante de proporcionalidad adicional tiene en cuenta el hecho de que, dependiendo de la aerodinámica del conjunto, solo influye una parte de la superficie. Y es que cuando cambiamos de la postura erguida de un ciclista que pasea a la posición encorvada de uno profesional, reducimos simultáneamente el área proyectada en la dirección del movimiento y el llamado coeficiente de resistencia aerodinámica, o coeficiente de arrastre.

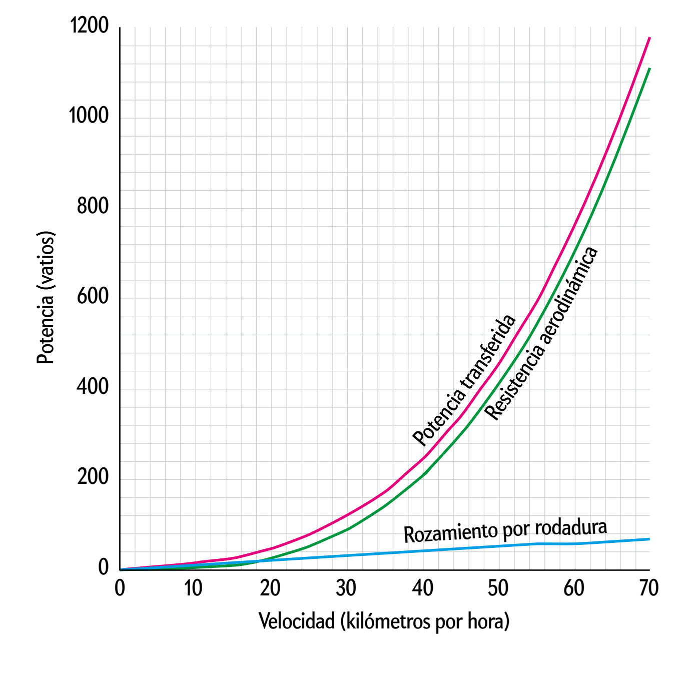
En experimentos realizados en el Instituto de Didáctica de la Física de la Universidad de Münster hemos estudiado las consecuencias de una y otra postura. Para ello, usamos fotografías para medir el área de la sección transversal y constatamos que la posición de carrera supone una reducción de aproximadamente el 16 por ciento. También determinamos las respectivas curvas de potencia y, a partir de ellas, calculamos que el coeficiente de arrastre era alrededor del 24 por ciento menor que en la posición erguida. Eso hace que, en conjunto, el aire ofrezca un 36 por ciento menos de resistencia. En nuestras pruebas, la posición de carrera redujo la potencia necesaria para alcanzar una velocidad de 20 kilómetros por hora de 61 a 45 vatios; es decir, en más de una cuarta parte. Sin embargo, si uno quisiera usar ese ahorro para ir más rápido, solo sería posible incrementar la velocidad en 3 kilómetros por hora, debido al efecto de la resistencia aerodinámica. Es poco probable que este dato disuada a quienes usan la bicicleta a diario de adoptar la postura erguida, mucho más cómoda.

Además, la fuerza de resistencia aerodinámica resulta proporcional a la densidad del aire, que a su vez depende de la temperatura y de la altitud. A nivel del mar es aproximadamente un 10 por ciento más baja a 30 grados centígrados que a 0 grados. Sin embargo, la capacidad de rendimiento del cuerpo disminuye con el calor, lo que echa por tierra parte de esta ventaja puramente aerodinámica. Además, un aire más enrarecido (ya sea por el calor o por una gran altitud) contiene menos oxígeno, lo que ejerce un efecto negativo sobre nuestro organismo.

Los músculos y la máquina

Armados con todas estas relaciones, podemos calcular las principales variables para una conducción por un terreno llano y sin viento. Con la bicicleta de nuestro experimento, para una posición erguida y una velocidad de 13,5 kilómetros por hora, el rozamiento por rodadura y la resistencia del aire eran de la misma magnitud. Esa velocidad es típica del uso cotidiano, así que, en el día a día, el rozamiento desempeña un papel considerable. Sin embargo, no vale demasiado la pena realizar un gran esfuerzo para mejorar la aerodinámica, sobre todo porque es probable que no estemos muy dispuestos a adoptar una postura incómoda en nuestros trayectos habituales. La situación cambia por completo en el ciclismo profesional, en el que se optimizan todos los detalles para lograr la mayor velocidad posible tanto en largas distancias como en los esprints, y donde las cuestiones relacionadas con la comodidad resultan secundarias.

Si pensamos ahora en el corredor que, casi tumbado sobre su bicicleta, se inclina elegantemente en una curva, o en alguien que avanza en su velocípedo



POTENCIA Y VELOCIDAD: La potencia que debe transmitirse a la bicicleta varía de manera no lineal con la velocidad. Para un ciclista en posición de carrera, esta gráfica muestra la potencia total transferida al vehículo (*rosa*), así como la parte debida al rozamiento por rodadura (*azul*) y a la resistencia aerodinámica (*verde*).

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN H. J. SCHLICHTING

confortablemente erguido a través de la ciudad, habremos de reconocer que en ambos casos tenemos la impresión de una unidad muy armoniosa entre el ciclista y su vehículo. Esta apreciación posee un trasfondo energético real. A la hora de transformar la energía corporal procedente del metabolismo en energía mecánica empleada en la propulsión, el ser humano solo es capaz de alcanzar una eficiencia de alrededor del 25 por ciento si se ayuda para ello de una bicicleta: en otras actividades físicas, el rendimiento suele ser considerablemente menor. Cuando corremos, por ejemplo, una gran parte de la energía mecánica no se usa directamente para avanzar, sino para elevar el centro de gravedad del cuerpo en cada zancada, entre otras cosas.

Si comparamos la eficiencia del ciclista con la llamada «eficiencia de Carnot» (el máximo teórico de rendimiento para toda máquina que funcione con dos focos térmicos), veremos que es del mismo orden de magnitud que, por ejemplo, la de un automóvil con motor de gasolina. Sin embargo, la comparación es engañosa, ya que un motor térmico está impulsado por las diferencias de temperatura. Algo así resulta imposible en el caso del ser humano: para ello, a una temperatura ambiente de 20 grados centígrados y en condiciones ideales, necesitaríamos una temperatura corporal de al menos 100 grados. En su lugar, el principio de funcionamiento de nuestro cuerpo se basa en transformar directamente la energía química que obtenemos de los alimentos. Con todo, nuestro organismo sí tiene algo en común con un motor: tres cuartas partes de esa energía se convierten en calor, el cual hemos de ceder al entorno con rapidez si queremos evitar el sobrecalentamiento. A ello se debe que, con una bicicleta estática y en un espacio cerrado, no podamos rendir al máximo durante mucho tiempo: nos falta la refrigeración del aire. A quien, como ciclista, le moleste el viento en contra, puede consolarse sabiendo que este es, en última instancia, tan importante como el suministro de energía a través de la alimentación.

Esa eficiencia del 25 por ciento se alcanza en condiciones óptimas. Sobre todo, hay que transmitir la energía a la bicicleta con un movimiento natural de las piernas, encaminado a obtener una cadencia óptima de pedaleo. Si el ciclista solo puede pedalear lentamente (con viento en contra o cuesta arriba) o debe hacerlo con gran frecuencia (con viento a favor o cuesta abajo), el proceso resulta excesivamente incómodo y agotador. Una bicicleta con marchas pone remedio a esta situación. Cuanto más diversas sean las condiciones a las que nos enfrentemos, mayor deberá ser el abanico de marchas de la bicicleta. Una postura cómoda y personalizada, que permita al ciclista concentrarse en la secuencia de movimientos, mejorará la eficiencia... pero posiblemente aumente la resistencia aerodinámica. En este sentido, el ciclista profesional se enfrenta a un verdadero problema de optimización.

Velocidades máximas

Para determinar las velocidades máximas o medias que pueden alcanzarse en una bicicleta hemos de tener en cuenta dos factores clave. Por un lado, la «potencia de salida»; es decir, la que se transfiere a la bicicleta. Por otro, dependiendo de su constitución y condición física, el ciclista podrá lograr una cierta potencia fisiológica, que aquí llamaremos «potencia de entrada». Esta incluye siempre —también en reposo— el metabolismo basal; esto es, el gasto energético mínimo que requiere el cuerpo para mantener la temperatura, la actividad cerebral, la respiración, el ritmo cardíaco y funciones similares. Más allá de este, que viene a ser del orden de unos 100 vatios, el cuerpo puede invertir en el movimiento toda la energía producida. Con estos datos y suponiendo una eficiencia del 25 por ciento, podemos calcular de manera aproximada la velocidad alcanzable en una bicicleta a partir de la máxima potencia de entrada que puede generar una persona durante diferentes períodos de tiempo (*véase la tabla adjunta*).

Duración	Potencia de entrada (vatios)	Potencia de salida (vatios)
Ininterrumpido	400	75
270 minutos	669	142
60 minutos	932	208
1 minuto	1712	303
5 segundos	4580	1120

METABOLISMO Y MOVIMIENTO: La potencia que puede suministrar nuestro cuerpo («potencia de entrada») depende del tiempo que dure el esfuerzo. Restando un metabolismo basal de unos 100 vatios y considerando que la bicicleta permite una eficiencia del 25 por ciento, resulta posible calcular qué potencia total se transfiere al vehículo («potencia de salida») en cada uno de los períodos de tiempo considerados.

A partir de la tabla y el diagrama de potencia que reproducimos aquí, vemos que un deportista entrenado podría alcanzar una velocidad punta de casi 70 kilómetros por hora durante cinco segundos. Debido a que los récords mundiales se logran con mejores bicicletas que la de nuestro ejemplo, los valores reales son aún mayores, como cabría esperar. Así, el francés François Pervis esprintó durante diez segundos a una velocidad media de 77 kilómetros por hora. Del mismo modo, al estimar la distancia que podría recorrerse en una hora, obtenemos unos 40 kilómetros, una cifra inferior al récord de la hora del británico Bradley Wiggins, quien logró 54,5 kilómetros.

Las discrepancias se deben, a buen seguro, a la gran calidad de las bicicletas de carreras modernas y al excelente rendimiento de los deportistas profesionales. Con todo, vemos que a partir de unos datos sencillos somos capaces de obtener unas estimaciones bastante acertadas. Ello se debe al considerable efecto de la resistencia del aire: aunque este apenas molesta a los ciclistas ocasionales, no tarda en mostrarles sus límites incluso a los mejores deportistas. Así pues, al menos desde un punto de vista energético, no hay un medio de transporte más democrático que la bicicleta.

PARA SABER MÁS

Man as an aero engine. D. R. Wilkie en *Journal of the Royal Aeronautical Society*, vol. 64, págs. 477-481, agosto de 1960.

The energetic cost of moving about. V. A. Tucker en *American Scientist*, vol. 63, págs. 413-419, julio de 1975.

EN NUESTRO ARCHIVO

Conducir sin manos. Wolfgang Bürger en *IyC*, agosto de 2003.

Equilibrio en bicicleta. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, abril de 2006.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid, donde investiga en teoría de sistemas complejos. Su labor docente y divulgativa ha sido reconocida por uno de los premios de la Real Sociedad Española de Física y la Fundación BBVA 2017.

La magia perenne del número pi

Tres acertijos poco conocidos y algo de historia sobre la constante más famosa de las matemáticas

π es sin duda la constante matemática más notoria. El famoso símbolo que la identifica proviene de la inicial de las palabras griegas περιφέρεια («periferia») y περίμετρον («perímetro») referidas a un círculo. Adoptado en 1706 por el matemático galés William Jones, se normalizó definitivamente gracias al gran Leonhard Euler. Que algo relacionado con las matemáticas sea popular roza lo insólito, pero el caso de π resulta mayúsculo: no solo aparece en camisetas o tazas, tatuado, en cortes de pelo o en títulos de novelas y películas, sino que incluso posee un día mundial propio: el 14 de marzo (mes 3, día 14).

Es probable que el hallazgo de π fuese uno de los primeros grandes descubrimientos empíricos en matemáticas. Al dividir el perímetro de un círculo, L, entre su diámetro, D, siempre se obtenía la misma constante con independencia de cuán grande o pequeño fuese el círculo:

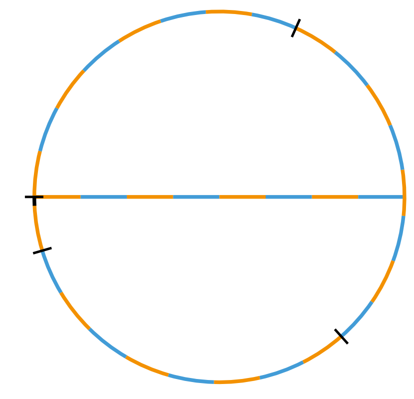
$$\pi = \frac{L}{D} \ .$$

En el colegio aprendemos esto mismo, que la longitud de una circunferencia vale 2π veces su radio, R:

$$L = 2\pi R \ .$$

Se trata de una ley de escala limpia y sencilla, pero eso no evita sorpresas. La intención de esta columna es demostrarlo a partir de tres sencillos problemas.

El primer acertijo se debe al matemático William Whiston, quien sucedió a Newton como Profesor Lucasiano en Cambridge. Supongamos que la Tierra es una esfera perfecta y que la ceñimos a lo largo del ecuador con una gran cuerda ajustada a su tamaño: unos 40.000 kilómetros de longitud. Si ahora añadimos un metro a esa cuerda y la levantamos, de modo que quede concéntrica con el ecuador, ¿podrá pasar por debajo de ella un conejo? Intente encontrar la respuesta antes de seguir leyendo.



1. ESTIMACIÓN BABILÓNICA DE PI: Al emplear como unidad de longitud la octava parte del diámetro *D* de una circunferencia, puede verse que el perímetro *L* viene dado con buena aproximación por 25 de tales unidades. Ello proporciona la estimación $\pi = L/D \approx 25/8$, usada en la antigua Babilonia.

Si R es el radio de la Tierra, la cuerda que ciñe el ecuador medirá $L = 2\pi R$. La segunda, un metro más larga, medirá

$$L' = L + 1 \ ,$$

y corresponderá a una nueva circunferencia de radio R', con

$$L' = 2\pi R'$$

(todas las longitudes se expresan en metros). Se nos pregunta por tanto acerca de la altura $h = R' - R$. Esta valdrá

$$h = \frac{L'}{2\pi} - \frac{L}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \ .$$

Ya hemos dado con la solución. Pero repare en lo siguiente: ¡el resultado no depende del tamaño de la esfera! Habríamos obtenido lo mismo al considerar la Tierra, una naranja o la órbita de Neptuno. ¿No le parece, a pesar de la sencillez de la ley de escala, algo antiintuitivo?

Medir π

¿Qué ocurre con el conejo? ¿Pasa o no pasa? La altura h vale $1/(2\pi) \approx 0{,}159$ metros, de modo que podría cruzar sin problemas. ¿Cómo he llegado a este resultado numérico? He usado una calculadora que incorpora el valor de π. Pero, obviamente, Whiston y sus antecesores no disponían de semejante artefacto. ¿Cómo calcularon entonces el valor de la constante?

Alrededor del año 2000 a.C., los matemáticos babilónicos estimaron π como

$$\pi_B = \frac{25}{8} = 3{,}125 \ .$$

En la figura 1 vemos un esbozo del método que probablemente usaron para llegar a esa conclusión. Dado un círculo arbitrario, siempre podemos dividir su diámetro D en 8 partes iguales. Si ahora intentamos recubrir la circunferencia con un número entero de arcos de longitud $D/8$, podremos comprobar que necesitaremos un total de 25 de ellos para, prácticamente, cerrar el círculo.

En el papiro Rhind, un documento del antiguo Egipto de carácter matemático-didáctico fechado hacia el año 1650 a.C., el escriba Ahmes explica un algoritmo para calcular el área de un círculo. Expresado en términos modernos, diría algo así: «Tome el diámetro, quítele la novena parte y eleve el resultado al cuadrado». Así que Ahmes nos aconseja evaluar el área de un círculo por medio de la ecuación

$$A \approx \left(\frac{8}{9}D\right)^2 = \left(\frac{16}{9}\right)^2 R^2 \ .$$

Y, dado que sabemos que el área de un círculo es $A = \pi R^2$, esto nos conduce a la siguiente estimación de π:

$$\pi_E = \left(\frac{16}{9}\right)^2 \approx 3{,}16 \ .$$

Pero ¿cómo llegaron los sacerdotes egipcios a esa conclusión? Los estudiosos piensan que el argumento geométrico pudo ser el que aparece ilustrado en la figura 2. Dado un círculo arbitrario, siempre podemos inscribirlo en un retículo de 18 casillas de lado. De esta manera, su radio R tendrá una longitud de 9 casillas. Observemos ahora que la cuarta parte del círculo puede cubrirse casi a la perfección

con las siguientes piezas: tres rectángulos, un triángulo rectángulo y dos trapecios rectangulares. El área del círculo, A, puede por tanto aproximarse a la de cuatro veces esas piezas. Por último, ocurre que cuatro copias de esas piezas pueden reordenarse para formar un cuadrado de 16 casillas de lado. Así, pues, tendremos que

$$A \approx \left(\frac{D}{18} \cdot 16\right)^2 = \left(\frac{16}{9}\right)^2 R^2 .$$

Calcular π

Las matemáticas babilónica y egipcia eran prácticas, algorítmicas; trataban de resolver problemas concretos relacionados con la agrimensura, la construcción o el comercio. Hubo que esperar a Arquímedes de Siracusa, a la matemática griega, para alcanzar el primer cálculo riguroso del valor de π.

Arquímedes usó un esquema basado en polígonos inscritos y circunscritos en una circunferencia, como los mostrados en la figura 3. El perímetro de tales polígonos proporcionaba cotas inferiores y superiores para la longitud de la circunferencia y, por tanto, para el valor de π. Cuantos más lados tenían los polígonos, más acotado quedaba el valor. Usando polígonos de hasta 96 lados, Arquímedes determinó que π estaba comprendido entre 3+10/71 y 3+1/7, es decir:

$$3{,}1408... < \pi < 3{,}1428... ,$$

exacto hasta el segundo decimal.

Pero Arquímedes hizo algo más. La aproximación que hicieron los babilónicos se basaba en la relación entre la longitud de la circunferencia y el diámetro: estimaron lo que podríamos llamar el «π-perímetro». Sin embargo, los egipcios se basaron en la relación entre el área del círculo y el cuadrado de su radio: estimaron el «π-área». Pero ¿quién nos asegura que se trata de la misma constante matemática?

Arquímedes lo hizo. Para ello, dedujo el área de un círculo mediante métodos similares al cálculo integral moderno. La demostración visual que aparece en la figura 4, la cual ya habíamos presentado con anterioridad en esta columna [*véase* «Demostraciones visuales», por Bartolo Luque; Investigación y Ciencia, octubre de 2013], es una variación de su método que no necesita palabras.

El ansia por calcular más y más decimales de π mediante el método de Arquímedes alcanzó su culmen en el Renacimiento. François Viète usó polígonos de 393.216 lados, lo que le permitió obtener hasta el noveno decimal. Con todo, el campeón de campeones fue Ludolph van Ceulen, quien alcanzó 35 cifras decimales al considerar un polígono regular de 2^{62} lados: más de 4,5 trillones.

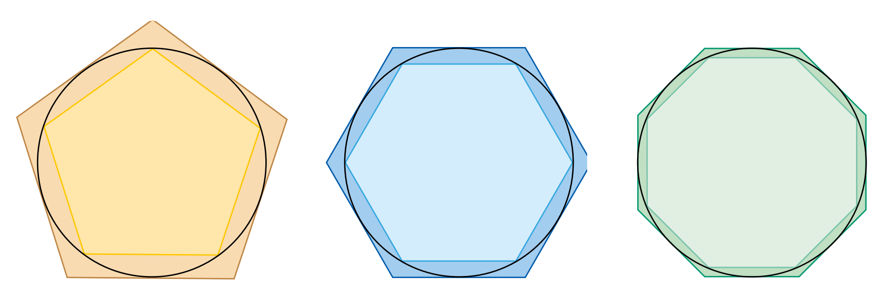
La ecuación $L = 2\pi R$ nos permite introducir una medida angular natural: el radián, definido como el ángulo que subtiende un arco de circunferencia cuya longitud es igual al radio. De esta manera, toda la circunferencia equivale a 2π radianes. Aunque según algunos matemáticos y físicos que apoyan el conocido como Manifiesto Tau, sería más natural utilizar la constante $\tau = 2\pi$. De esta manera, la circunferencia tendría τ radianes y el período de las funciones seno y coseno sería simplemente τ, en vez de 2π.

El radián me sirve para introducir uno de los primeros métodos analíticos para calcular π. A partir del desarrollo en serie de Taylor de la función arco-tangente, presentado por primera vez por Newton, John Machin llegó a calcular hasta 100 decimales. Una variante de la fórmula empleada por Machin es la siguiente:

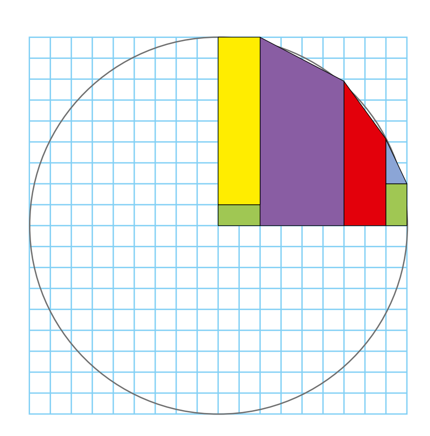
$$\frac{\pi}{4} = \arctan(1/2) + \arctan(1/5) + \arctan(1/8) .$$

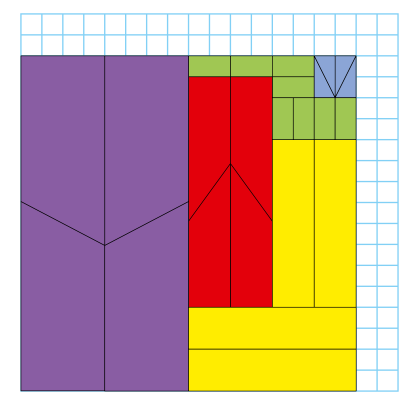
En la figura 5 vemos una notable demostración gráfica de esta identidad.

La fórmula de Machin tuvo asociado otro campeón: en 1873, el matemático

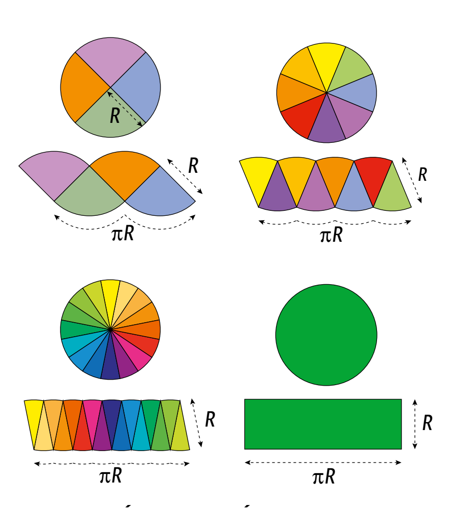


3. EL CÁLCULO DE ARQUÍMEDES: Ejemplos de polígonos regulares inscritos y circunscritos en una circunferencia. En cada caso, los respectivos perímetros proporcionan cotas inferiores y superiores a la longitud de la circunferencia y, por tanto, al valor de π. Esta aproximación funciona tanto mejor cuanto mayor es el número de lados de los polígonos considerados.





2. ESTIMACIÓN EGIPCIA DEL ÁREA DEL CÍRCULO: Al inscribir un círculo en un cuadrado de 18 casillas de lado (*arriba*), vemos que el área de un cuarto de círculo puede aproximarse por las figuras indicadas. A su vez, cuatro copias de esas piezas pueden reordenarse para formar un cuadrado de 16 casillas de lado (*abajo*). Dado que el área de un círculo es $A = \pi R^2$, podemos concluir que $\pi \approx (16/9)^2$.



4. DEL PERÍMETRO AL ÁREA: Demostración visual del proceso que permite concluir que el área A de un círculo de radio R viene dada por $A = \pi R^2$.

aficionado William Shanks logró, tras 20 años de cálculos a mano, 707 decimales. Por desgracia, en 1944 se descubrió un error en el decimal 528, a partir del cual todos los posteriores eran erróneos. El truco de Machin se empleó hasta comienzos de la era informática. A partir de ahí, algoritmos cada vez más rebuscados han permitido obtener más de 10 billones de decimales.

Ríos y asteroides

Concluyamos con una sorprendente aparición del número π en las ciencias de la Tierra. Se conoce como sinuosidad s de un río el cociente entre la longitud L de su curso y la longitud l de la línea recta que une su nacimiento con su desembocadura:

$$s = \frac{L}{l} \, .$$

Si $s \approx 1$, el río será prácticamente recto, mientras que si $s \gg 1$ su curso será muy retorcido. En esencia, la morfología del curso de un río se debe a dos procesos opuestos: la erosión y la deposición lateral, que aumentan la sinuosidad, y la formación de brazos muertos o lagos en herradura por estrangulamiento del curso, que la disminuyen.

En 1996, Hans-Henrik Stølum, de la Universidad de Cambridge, se basó en estos mecanismos para simular la evolución espaciotemporal de los ríos. La gráfica de la figura 6 muestra cómo va cambiando la sinuosidad a lo largo de 30.000 iteraciones de una simulación. Partiendo de un río inicial muy poco sinuoso, la erosión y el estrangulamiento van cambiando s hasta que acaba fluctuando alrededor de un valor crítico, s_c, indicado en la gráfica por una línea punteada.

Tras promediar un gran número de simulaciones, Stølum determinó que dicho valor crítico era

$$s_c = 3{,}14 \pm 0{,}34 \, ;$$

es decir, ¡$s_c = \pi$!

Quizá la aparición de π en este contexto no sea tan extraña como aparenta. Para hacernos una idea de su procedencia, vayamos al **segundo acertijo** prometido. Supongamos que la recta de color negro de la figura 7 mide l. ¿Cuánto medirá el curso L del «río» compuesto por semicircunferencias de radios arbitrarios? ¿Cuánto valdrá la sinuosidad? ¿Cómo dependerá s del número de semicircunferencias? Piense antes de continuar.

Si usamos n semicircunferencias de radios $R_1, R_2, ..., R_n$, tendremos que la suma de sus diámetros será igual a la longitud de la recta:

$$l = 2(R_1 + R_2 + \cdots + R_n) \, .$$

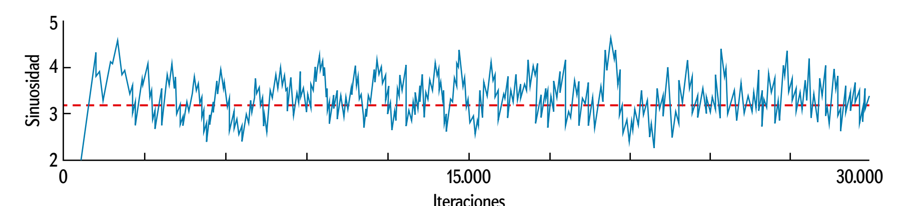
Puesto que la longitud de la i-ésima semicircunferencia es $L_i = \pi R_i$, tendremos también que la suma de la longitud de todas las semicircunferencias será

$$L = \pi \, (R_1 + R_2 + \cdots + R_n) \, .$$

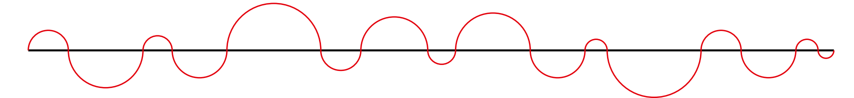
De modo que $s = L/l = \pi/2$, con independencia del tamaño y número de semicírculos empleados. De nuevo, un resultado universal basado en nuestra querida ecuación $L = 2\pi R$.

Y ya para acabar, presentemos el **tercer problema**, que tomo prestado de Joaquín Navarro y su excelente libro *Los secretos del número* π. Todos recordamos que el Principito procedía de un pequeño asteroide llamado B-612, donde se dedicaba a las surrealistas tareas de deshollinar tres pequeños volcanes, limpiar el suelo de semillas de baobab y cuidar de una rosa. Imaginen que el asteroide es perfectamente esférico y que el Principito le da una vuelta por el ecuador. Los pies del Principito recorrerán exactamente el perímetro del asteroide, pero su cabeza viajará una distancia algo mayor.

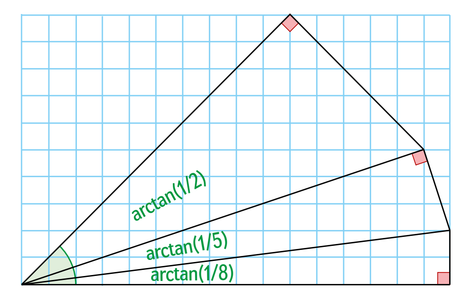
Supongamos que el Principito repite el mismo paseo pero en nuestro planeta. La diferencia entre lo que recorren sus pies y su cabeza ¿sería en ese caso superior? Esta vez no haré explícita la solución, porque ahora hasta el conejo de nuestro primer problema lo tiene claro, ¿verdad?



6. PI FLUVIAL: La sinuosidad de un río se define como el cociente entre la longitud de su curso, L, y la de la línea recta que une el nacimiento con la desembocadura, l. En 1996, Hans-Henrik Stølum demostró mediante simulaciones informáticas que, con el paso del tiempo, la sinuosidad $s = L/l$ acaba oscilando en torno al valor crítico $s_c = 3{,}14 \pm 0{,}34$; es decir, π.



7. APROXIMACIÓN CON SEMICÍRCULOS: En el caso simplificado de un río formado por semicírculos en torno a una misma recta, puede demostrarse que la sinuosidad viene siempre dada por π/2, con independencia del número y el tamaño de los semicírculos.



5. PI Y LA FUNCIÓN ARCO-TANGENTE: La función arco-tangente, arctan(x), es la inversa de la tangente; es decir, nos devuelve el ángulo (en radianes) cuya tangente es x. En esta figura, el triángulo rectángulo inferior tiene catetos de 2 y 16 casillas, por lo que el ángulo señalado en verde mide arctan(2/16). El siguiente triángulo rectángulo está formado por un cateto que mide la diagonal de 3 casillas, y un segundo de 5 veces esa distancia, lo que determina un ángulo de arctan(1/5). Finalmente, el triángulo rectángulo superior se compone de catetos de 5 y 10 veces la diagonal de una casilla, lo que añade un ángulo de arctan(5/10). Como puede apreciarse a simple vista, la suma de los tres ángulos nos proporciona un ángulo final de π/4 radianes (45 grados). Ello demuestra la identidad π/4 = arctan(1/2) + arctan(1/5) + arctan(1/8), muy usada a lo largo de la historia para calcular π.

PARA SABER MÁS

River meandering as a self-organization process. Hans-Henrik Stølum en *Science*, vol. 271, págs. 1710-1713, marzo de 1996.

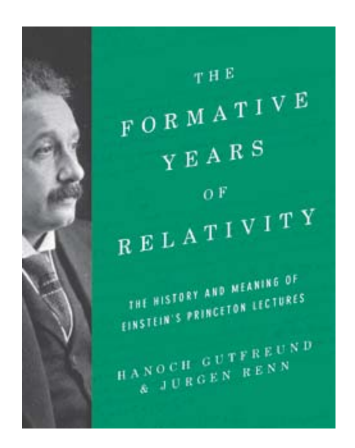
El omnipresente número π. A. V. Zhúkov. Editorial URSS, 2004.

Los secretos del número π: ¿Por qué es imposible la cuadratura del círculo? Joaquín Navarro. RBA Libros, 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Ramanujan y el número pi. Jonathan M. Borwein y Peter B. Borwein en *IyC*, abril de 1988.

Las cifras decimales del número pi. Jean-Paul Delahaye en *IyC*, enero de 2011.



THE FORMATIVE YEARS OF RELATIVITY
THE HISTORY AND MEANING OF EINSTEIN'S PRINCETON LECTURES
Hanoch Gutfreund y Jürgen Renn
Princeton University Press, 2017

The meaning of relativity de Einstein, en contexto

Un repaso histórico al desarrollo y la recepción temprana de la teoría de la relatividad general

El 6 de noviembre de 1919 tuvo lugar en el edificio Burlington House de Londres, muy cerca de Piccadilly Circus, una reunión conjunta de la Real Sociedad y la Real Sociedad Astronómica. Una numerosa audiencia se reunió bajo la presidencia de J. J. Thomson, *master* del Trinity College de Cambridge desde marzo de 1918, que hacía pocos meses había dejado la dirección del Laboratorio Cavendish. La reunión se había convocado para comunicar los resultados de las observaciones realizadas por una expedición científica británica organizada bajo la dirección de Arthur Eddington, catedrático de astronomía en la Universidad de Cambridge, y Frank Dyson, el Astrónomo Real, a la isla Príncipe, en África, y a Sobral, en el norte de Brasil. Su fin principal era utilizar el eclipse de Sol del 29 de mayo para comprobar si se verificaba una de las consecuencias de la teoría de la relatividad general que Albert Einstein había completado en noviembre de 1915: que los rayos de luz se curvaban en presencia de un campo gravitacional. Se anunció entonces que la predicción de la teoría einsteiniana se verificaba. El día siguiente, *The Times* anunciaba:

REVOLUCIÓN EN CIENCIA
Nueva teoría del universo
Ideas newtonianas desbancadas

Comenzaba así la imparable ascensión de Einstein a la fama mundial. Y, con la fama, invitaciones de prácticamente todas partes del mundo. Una de esas invitaciones le llegó en octubre de 1920 a través de Luther P. Eisenhart, catedrático de la Universidad de Princeton y especialista en geometría diferencial, la rama de las matemáticas en la que se basaba la teoría de la relatividad general. Einstein respondió que podría ir a Princeton en septiembre de 1921, pero, siguiendo el consejo de su amigo Paul Ehrenfest, el sucesor de Hendrik A. Lorentz en Leiden, pidió como honorarios la astronómica cifra de 15.000 dólares. La universidad le contestó que no podía cumplir con su exigencia y ahí acabo todo.

Muy diferente fue la reacción de Einstein cuando el 16 de febrero de 1921, Chaim Weizmann, presidente de la Organización Mundial Sionista, notable químico de la Universidad de Manchester y futuro primer presidente del Estado de Israel (fue elegido el 16 de febrero de 1949), pidió a Kurt Blumenfeld, un destacado sionista, que invitase en su nombre a Einstein a acompañarle en una visita a Estados Unidos para recaudar fondos destinados a la creación de una Universidad Hebrea en Jerusalén, cuya primera piedra había sido depositada el 24 de julio de 1918. Cuatro días después, Blumenfeld telegrafiaba a Weizmann: «Einstein preparado para unirse a usted hacia América, sigue carta».

En la biografía que escribió de Einstein, la primera realmente importante (la primera edición se publicó en Zúrich en 1952: *Albert Einstein und die Schweiz*), el escritor suizo Carl Seelig describió aquel viaje en los siguientes términos: «Einstein salió de Róterdam el 23 de marzo de 1921. En el muelle de Nueva York le tributaron un recibimiento digno de una primera actriz y lo pasearon en coche de lujo para mostrarlo a la población. El Ayuntamiento le preparó un recibimiento solemne en el Teatro Metropolitano de la Ópera y quiso nombrarlo hijo predilecto de la ciudad. En la sesión decisiva, en la que había que recabar el acuerdo, un concejal afirmó que nunca había oído el nombre de Einstein y que, por lo tanto, no podía aprobar la propuesta. El recorrido triunfal de Einstein continuó sin disminuir de entusiasmo en Washington, donde lo recibió el presidente Warren Harding, y en Princeton, donde dio sus cuatro primeras conferencias. El rector de la universidad lo ensalzó diciendo que era "un nuevo Colón de la ciencia, que navega solitario por el mar del pensamiento". También visitó Boston y Chicago. A últimos de mayo emprendió el viaje de regreso a Inglaterra, donde fue huésped del ministro de la Guerra y Gran Canciller, Lord Haldane, quien lo llevó como conferenciante al King's College y lo presentó al arzobispo de Canterbury, a G. B. Shaw, a Lloyd George y a otras interesantes personalidades. Einstein depositó una corona de flores en la tumba de Newton, en la abadía de Westminster».

En Princeton, Einstein pronunció, durante la primera semana de mayo, no cuatro conferencias, como decía Seelig, sino cinco. Las dos primeras («Generalidades sobre la teoría de la relatividad») destinadas a un público general y las tres siguientes («Fundamentos de la teoría especial de la relatividad», «Fundamentos de la teoría general de la relatividad» y «El problema cosmológico») a especialistas. Su presencia en Princeton atrajo una audiencia muy numerosa que pronto desfalleció ante la complejidad de sus explicaciones: más de 400 personas asistieron a la primera conferencia, pero el segundo día el auditorio «estaba medio lleno» y para el tercero bastó una pequeña aula.

Mientras estuvo en Princeton, Einstein llegó a un acuerdo con la Princeton University Press para publicar un libro con el texto de sus conferencias, según el cual el físico recibiría unos derechos de autor del 15 por ciento del precio de venta. No obstante, Einstein tardó en cumplir su compromiso, ocupado como estaba con muchos otros menesteres consecuencia de su fama. Fue a finales de 1921 cuando envió a Oswald Veblen, catedrático de matemáticas de la Universidad de Princeton, el texto, en alemán, que preparó y que básicamente se correspondía con las tres conferencias más especializadas. El propio Einstein pidió que la traducción al inglés la hiciera Edwin P. Adams, catedrático de física también en Princeton, que había realizado la traducción simultánea del alemán al inglés de las conferencias de Einstein.

El libro lo publicó por primera vez en su original alemán, en 1922, la editorial Druck und Verlag von Friedr. Vieweg & Sohn Akt.-Ges., con el título *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie gehalten im Mai 1921 an der Universität Princeton* (una segunda edición apareció el año

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Einstein: La relatividad general y la reinvención de la realidad*, un número monográfico de *Investigación y Ciencia* sobre la historia y el impacto de una de las creaciones intelectuales más profundas y originales del siglo xx.





siguiente). En 1917, Einstein ya había elegido esta misma editorial para publicar un libro de carácter popular para divulgar las dos teorías de la relatividad, *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, que tuvo mucho éxito: la primera edición constó de 2000 ejemplares; la segunda (también de 1917), de 1500; la tercera (1918), de 3000, y la cuarta (1919), de otros 3000. A partir de entonces, es decir, una vez anunciados los resultados de la expedición británica que confirmó la predicción de la teoría de la relatividad general sobre la curvatura de los rayos de luz, las ediciones y ventas se dispararon: en 1922 ya se habían realizado catorce reimpresiones, con un total de 65.000 ejemplares. No es sorprendente, por tanto, que se tradujera con rapidez a otros idiomas. La primera traducción, al inglés, apareció en Inglaterra (Methuen, Londres) en 1920. El año siguiente se publicaba en Estados Unidos (Holt, Nueva York) y también lo hacían las traducciones al francés, italiano, ruso y castellano: *Teoría de la relatividad especial y general* (Peláez, Toledo), traducida por el matemático Fernando Lorente de No, discípulo del matemático riojano Julio Rey Pastor. En 1922 aparecía una traducción al húngaro, en 1923 al yiddish y en 1928 al hebreo.

El libro basado en las conferencias de Princeton era más exigente desde el punto de vista de su contenido. En inglés se publicó primero en Inglaterra, a cargo de la editorial Methuen, con el título *The meaning of relativity*, también en 1922, mientras que la edición de Princeton University Press llegó en 1923, aunque existe cierta confusión sobre la fecha. En la bibliografía de las publicaciones de Einstein incluida en una referencia tan destacada como la obra dirigida por Paul A. Schilpp, *Albert Einstein: Philosopher-scientist* (Open Court, La Salle, 1949), se la data, erróneamente, en 1921. Incluso en la primera edición coexiste la fecha 1923 en la página del título con 1922 en el interior como año de publicación.

Es esta obra sobre la que pivota el libro de Hanoch Gutfreund y Jürgen Renn, de cuyas 415 páginas 200 están ocupadas por la reproducción de *The meaning of relativity* más los dos apéndices que Einstein añadió posteriormente, el primero a la segunda edición (1945) y el segundo a la tercera (1950), este revisado posteriormente tanto en la cuarta edición (1953) como en la quinta (1956). Asimismo, se reproducen (ocupan 20 páginas) las dos primeras conferencias que pronunció en Princeton, el 9 y el 10 de mayo. Mientras que para *The meaning of relativity* Einstein reelaboró las tres conferencias de Princeton, en este caso lo que se reproduce es el texto que tomó un estenógrafo. Este ya se incluyó en el volumen 7 de los *Collected papers of Albert Einstein* (Princeton University Press, 2002), pero en él aparecían muchos espacios en blanco que en esta ocasión se han rellenado siguiendo el criterio de Gutfreund y Renn.

Si solo fuera por esto, por la reproducción de los textos de Einstein, el libro ahora publicado tendría un valor limitado, ya que *The meaning of relativity* es una obra de la que no es difícil disponer, y el contenido de las dos conferencias no es demasiado interesante. Pero *The formative years of relativity* es mucho más. En cierto sentido, *The meaning of relativity* es una excusa para que Gutfreund y Renn, el primero director del Archivo Einstein, ubicado en la Universidad Hebrea de Jerusalén, de la que también es catedrático emérito de física teórica, y el segundo director del Instituto Max Planck de Historia de la Ciencia de Berlín y seguramente el mejor conocedor de la historia de la física relativista, repasen y resuman el desarrollo e implicaciones de la teoría de la relatividad general a partir de que Einstein encontrase su formulación definitiva en 1915.

Así, y después de dos capítulos obligados por el tema central del libro, «El primer viaje de Einstein a América» y «Estructura y contenido de *The meaning of relativity*», en los diferentes capítulos previos a la reproducción de la obra y las dos conferencias de Princeton se analizan las siguientes cuestiones: «Física y geometría», «Los principios de la relatividad general», «Las primeras soluciones y el reto de su interpretación», «Einstein y los astrónomos», «La génesis de la cosmología relativista», «La controversia de las ondas gravitacionales», «Debates filosóficos sobre la relatividad general», «La búsqueda de una teoría del campo unificado», «Primeras monografías sobre la relatividad» y «Más allá de los años formativos». El resultado es un magnífico resumen y actualización de lo que un no demasiado numeroso conjunto de historiadores de la física y la matemática ha producido sobre el desarrollo de la teoría general de la relatividad entre los años 1915 y 1922.

En este sentido, pocas cosas aparecen en este libro que no se puedan encontrar en trabajos publicados anteriormente, pero estos tienen el inconveniente de haber aparecido en publicaciones muy diversas, no siempre fáciles de conseguir, de manera que *The formative years of relativity* sirve para remediar en parte tal situación. Por supuesto, y como en cualquier obra, no está todo lo que fue. Es inevitable que así sea. Una de esas carencias se halla, por ejemplo, en el capítulo «Debates filosóficos sobre la relatividad general», en el que únicamente se abordan los debates que tuvieron lugar (y no todos; básicamente los relacionados con Moritz Schlick y Hans Reichenbach) en el mundo de habla alemana, dejando por consiguiente al margen el muy rico escenario filosófico británico.

Particularmente relevante para una obra como esta es el capítulo «La búsqueda de una teoría del campo unificado», ya que el segundo apéndice («Generalizaciones de la teoría de gravitación») que Einstein añadió a *The meaning of relativity* trata precisamente de este tema (el apéndice I está dedicado a la cosmología), que como es bien sabido le ocupó una buena parte de las últimas décadas de su vida, empeñado como estaba en encontrar una teoría que uniese en un mismo marco (del mismo estilo que el de la relatividad general, esto es, geométrico) gravitación y electromagnetismo, empresa en la que no tuvo éxito [*véase* «Sobre la teoría generalizada de la gravitación», por Albert Einstein; Investigación y Ciencia, noviembre de 2015].

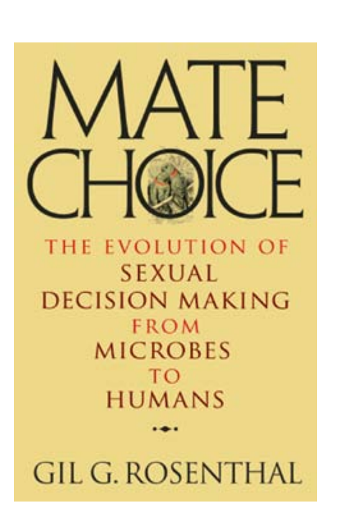
The meaning of relativity fue traducido pronto a otros idiomas. Las primeras traducciones, basadas en la edición ale-

mana, fueron la polaca y la rusa, publicadas en 1923, a la que siguió en 1924 la francesa, traducida por Maurice Solovine, amigo de Einstein de los tiempos de Berna. También se vertió al castellano, aunque bastante más tarde, en 1948: *El significado de la relatividad* (Espasa-Calpe, Madrid). La traducción corrió a cargo del químico argentino, con intereses en historia de la ciencia, Carlos Evaristo Prelat (1910-1980). Apareció en una colección dirigida por Julio Rey Pastor, quien desde 1921 ocupaba una cátedra en la Universidad de Buenos Aires, aunque mantenía la que ya tenía en la Universidad Central de Madrid, con la que cumplía durante las vacaciones escolares argentinas. El que Prelat fuese el traductor de *The meaning of relativity* hay que entenderlo en este contexto.

Einstein intentó que la versión española se realizase enseguida, como había sucedido con *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*. En el volumen 13 de los *Collected papers of Albert Einstein* (Princeton University Press, 2012) se señala que el 20 de noviembre de 1922 Einstein escribió a Vieweg, la editorial que había publicado *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie*, reclamando los royalties de la edición española de *Teoría de la relatividad especial y general* y solicitando que se enviase a los editores españoles un ejemplar de la última edición corregida. Asimismo, pedía que se mandasen ejemplares de *Vier Vorlesungen über Relativitätstheorie* a la Sociedad Matemática Española en Madrid. Que no se tradujese entonces el libro probablemente se debió a que su lectura era más difícil, con lo que los posibles lectores serían mucho menos numerosos que los de *Teoría de la relatividad especial y general*. No olvidemos, asimismo, que prácticamente no había científicos —físicos o matemáticos— en España que se ocupasen, divulgación aparte, de las teorías relativistas de Einstein, salvo en algunas, muy escasas ocasiones.

Diré para terminar que tanto *Teoría de la relatividad especial y general* como *El significado de la relatividad* han sido objeto de numerosas ediciones, un detalle que proporciona un valor añadido a este magnífico *The formative years of relativity* de Gutfreund y Renn.

—José Manuel Sánchez Ron
Real Academia Española
Universidad Autónoma de Madrid



MATE CHOICE
THE EVOLUTION OF SEXUAL DECISION MAKING FROM MICROBES TO HUMANS
Gil G. Rosenthal
Princeton University Press, 2017

Mecanismos de selección sexual

La riqueza en la toma de decisiones que rodean la elección de pareja en el mundo animal

Sin extremos retóricos, la decisión de aparearse, en la teoría de la evolución, puede elevarse al rango de motor de la eficacia biológica del individuo. Empleando una metáfora clásica, concluye Gil Rosenthal en un exhaustivo *Mate choice* que las regularidades descubiertas en la elección de pareja reflejan la preferencia y exuberancia dionisíacas refrendadas por los intereses apolíneos en la fecundación y la supervivencia. Todo organismo que provenga de una interacción sexual es lo que es por la decisión tomada por sus progenitores. Desde los primeros momentos de la adquisición evolutiva de la reproducción sexual, cuando las parejas de organismos comenzaron a transmitir sus genes a la progenie, la elección del socio complementario desempeñó un papel determinante en la constitución, la morfología y la conducta. Y arrancó una suerte de evolución de uno y otro sexo; en parte, la dinámica de esa coevolución tendría que implicar mecanismos electivos.

Charles Darwin, que presentó una descripción sumamente detallada y clara de la selección sexual en *The descent of man*, no reparó en la importancia de la preferencia de apareamiento en la selección sexual; ni siquiera identificó con nitidez la evolución de la elección de pareja entre los puntos nucleares de la teoría. De entonces acá, sin embargo, el desarrollo experimentado por esa área del conocimiento ha sido espectacular. A mediados del siglo xx, la teoría conocida como «síntesis moderna de la evolución» sostenía que la función exclusiva de la elección de pareja era la de constituir un freno contra el flujo de genes entre especies. Theodosius Dobzhansky, en 1970, siguiendo lo avanzado por Ronald Fisher en 1930, creía que la selección contra la hibridación constituía la fuerza primaria que operaba en las preferencias de las hembras. En cambio, Ernst Mayr proponía, también en 1970, que las barreras levantadas por la conducta al apareamiento habían evolucionado como consecuencia del aislamiento geográfico.

En 1983 se publicó el primer libro monográfico sobre la cuestión, *Mate choice*, escrito por Patrick Bateson, profesor de Cambridge. Se conocían entonces solo unos pocos modelos teóricos y una cifra insignificante de estudios empíricos en aves y mamíferos. En los últimos años, sin embargo, hemos asistido a una cascada de investigaciones y a la multiplicación consiguiente de resultados. Le siguió en 1994 una síntesis orientadora de Malte Andersson, *Sexual selection*.

El llamado modelo de Fisher, actualizado como modelo de Fisher-Lande-Kirkpatrick, implica un rasgo de preferencia en la hembra y un rasgo de ornato en el macho. Las hembras con preferencia por un ornato llamativo tendrán progenie con genes de ornato paterno y genes de preferencia por ornato llamativo de la madre. Se produce así una correlación entre ornato y preferencia. Entre los modelos avanzados sobresalen los que se atienen a los beneficios directos que reporta el acierto en la elección. Pero no existen modelos de aplicación universal. Hasta que se consigan, habrá que ahondar en el estudio de los costes de la elección, la evolución de las

correlaciones genéticas entre ornato del macho y preferencias de la hembra, la mutua elección de la pareja y la evolución de rasgos y preferencias múltiples sexualmente seleccionadas, entre otros.

La elección de pareja propicia la conversión de una excitación en una interacción sexual. Una investigación reciente identificaba un receptor hormonal que actúa como portero molecular en las decisiones relativas la reproducción. Centrarse en los mecanismos de elección de pareja puede esclarecer enigmas evolutivos que desde hace tiempo rodean a la selección sexual y a la especiación. Mucho después de que se hubieran buscado respuestas evolutivas para explicar la constitución de estructuras complejas (como el ojo de los vertebrados), la cola del pavo real y otros ornatos que dejaban expuestos a los depredadores dejaron perplejo al mismo Darwin.

Durante más de un siglo, la sensibilidad y cierto androcentrismo privilegiaron el foco de atención en los adornos del macho, con escasa atención a lo que guiaba las decisiones de la hembra. La investigación reciente ha comenzado a revelar la complejidad de los mecanismos de elección de pareja sexual, obligando a reevaluar su historia y función evolutiva. En la mayoría de las especies, las hembras sincronizan el tiempo de reproducción para que coincida con el período de fertilidad. Se ha estudiado la regulación neuromolecular de la conducta de apareamiento de las hembras del cíclido *Astatotilapia burtoni*. La identificación de los factores que indican fertilidad al cerebro puede aportar acceso a los circuitos neurales que controlan conductas sexuales. Si una hembra queda suficientemente impresionada por un macho que la corteja, lo sigue a su territorio, donde la pareja nada en círculos cerrados: la hembra libera huevos y se los lleva a la boca. El macho fertiliza los huevos, succionando la región urogenital a medida que va liberando esperma. En los mamíferos, los receptores de prostaglandinas son decisivos para la preñez y podrían desempeñar una función semejante en la modulación de la elección de pareja a través de un aborto diferencial o una asignación de recursos.

En muchas especies, los individuos responden a los cambios en los costes y beneficios de la elección de la pareja mediante el ajuste de su grado de elegibilidad, sus preferencias de socio, su estrategia de selección o muestreo, o una combinación de todo ello. Por botón de muestra, la hembra del cangrejo violinista (*Uca annulipes*) es menos selectiva a medida que el tiempo va restringiendo sus posibilidades de reproducción exitosa; la hembra del pecílido *Xiphophorus helleri* cambia su preferencia por aleta caudal con espada larga a aleta caudal con espada corta de los machos bajo un elevado riesgo de depredación; la hembra del antílope americano (*Antilocapra americana*) abrevia su tiempo de escarceo o muestreo moviéndose por distancias más cortas y visitando a menos machos cuando está en condiciones más degradadas.

Típicamente, la elección de la pareja se realiza entre específicos. Pero no siempre es el caso. Las mismas condiciones dinámicas que producen variabilidad en la elección de la pareja en el interior de la especie pueden también promover o inhibir un apareamiento entre especies distintas. El autor ha investigado de manera exhaustiva el comportamiento de *Xiphophorus*, un pez de fecundación interna que se extiende de México septentrional a Honduras. Muchas especies son simpátricas. Aunque es mínimo, si existe, el aislamiento postcigótico entre especies, tampoco suele darse en la naturaleza la hibridación. La preferencia por una pareja coespecífica constituye una barrera contra el flujo génico. Frente a la rareza de la hibridación observada en otras, el par de especies formado por *Xiphophorus birchmanni* y *Xiphophorus malinche* constituye una excepción. Estas especies suelen hibridar de inmediato en la cuenca del río Pánuco, con registros de introgresión a través de diversas zonas híbridas. Aunque las hembras de cada especie son morfológicamente semejantes, los machos difieren en caracteres sexualmente dimórficos; por ejemplo, la presencia (*Xiphophorus malinche*) o la ausencia (*Xiphophorus birchmanni*) de una larga espada en la aleta caudal. Los machos cortejan a las hembras nadando en paralelo con ellas mientras levantan su aleta dorsal. Cortejarán también a hembras de una y otra especie. *Xinophorus birchmanni* muestra preferencia por su coespecífica, más que por *Xiphophorus malinche*.

En cualquier caso, la elección de pareja está sometida a múltiples fuerzas de selección, además de a la variabilidad en cuanto a beneficios obtenidos en la eficacia biológica; entre ellos, la selección contra el apareamiento entre heteroespecíficos, parientes consanguíneos y coespecíficos incompatibles.

—*Luis Alonso*

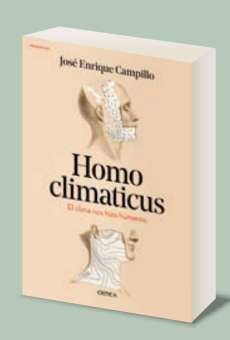
NOVEDADES



LA INVENCIÓN MATEMÁTICA
CÓMO SE INVENTA: EL TRABAJO DEL INCONSCIENTE
Henri Poincaré
Edición de Francisco González Fernández
KRK Ediciones, 2018
ISBN: 978-84-8367-603-5
111 págs. (9,95 €)



17 MUJERES PREMIOS NOBEL DE CIENCIA
Hélène Merle-Béral
Plataforma Editorial, 2018
ISBN: 9788417114695
312 págs. (20 €)



HOMO CLIMATICUS
EL CLIMA NOS HIZO HUMANOS
José Enrique Campillo Álvarez
Crítica, 2018
ISBN: 978-84-17067-87-8
400 págs. (19,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

MAYO



1968

1918



1868

1968

La Luna desvelada

«En uno de los pasillos del Centro Espacial Boeing, cerca de Seattle, hay un pequeño cartel que reza "5 de 5". Así se resume el hecho de que las cinco misiones del programa Lunar Orbiter, ideadas primordialmente para tomar fotografías del satélite desde la sonda espacial, se culminaran con éxito. Los resultados incluían una cobertura fotográfica completa de la cara visible de la Luna desde la Tierra, y una cobertura del 99,5 por ciento de la cara oculta. La serie Lunar Orbiter fue uno de los tres programas organizados por la NASA para preparar las misiones Apolo en las que el hombre pisaría el satélite. Las cinco sondas Lunar Orbiter tomaron un total de 1950 fotos. Estas han sido empleadas por la NASA para elegir cinco posibles puntos de alunizaje entre unos 40 lugares identificados mediante observaciones desde la Tierra.»

1918

Las mujeres en la industria bélica

«Según informan despachos procedentes de Londres, el ministro de Amunicionamiento declaró: "Salvo circunstancias imprevistas, nuestras existencias de municiones nos permitirían sostener una batalla con la máxima intensidad hasta el invierno sin menoscabo de nuestras necesidades para 1919". Todos hemos sabido de la gran labor de las mujeres en esta guerra; pero ni mucho menos estábamos preparados para la asombrosa afirmación de que nueve décimos de esta enorme producción de granadas artilleras se debe al trabajo de más de tres cuartos de millón de mujeres, quienes, antes de la guerra, jamás habían visto un torno.»

Aerogramas

«Es evidente que si un avión puede llevar una carga de bombas a centenares de millas, cualquiera que sea el estado del tiempo y en las condiciones más adversas, sin duda podrá hacerse que, en tiempos de paz, el mismo aparato vuele con una carga de correo, mercancías de escaso peso o pasajeros. Le ha sido reservada a EE.UU. la inauguración del primer servicio de correo aéreo realmente digno de tal nombre entre Nueva York, Filadelfia y Washington. Aunque estrictamente no seamos desde luego el primer país que establece un servicio de correo aéreo, no cabe duda de que somos los primeros en inaugurar uno regular que funciona con un horario fijo y abierto al público.»

1868

Un clima de invernadero

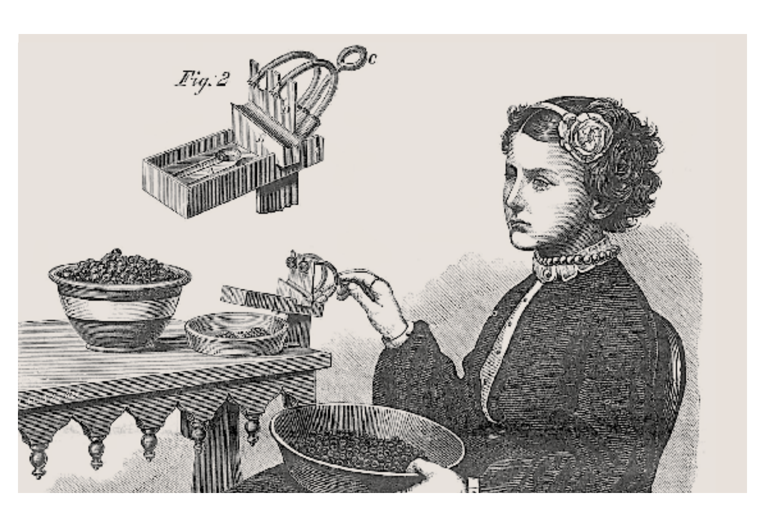
«La atmósfera primitiva de la Tierra era mucho más rica en ácido carbónico gaseoso [dióxido de carbono] que la actual, y por ello no apta para la respiración de los animales de sangre caliente. Hace tiempo se señaló la acción de las plantas en la purificación de esta atmósfera. Las investigaciones del Dr. Tyndall sobre el calor radiante descubrieron que la presencia de unas pocas centésimas de gas carbónico en la atmósfera, además de no impedir apenas el paso de los rayos solares, bastaría para evitar casi del todo las pérdidas por radiación de calor oscuro. Bajo esa capa atmosférica, la superficie terrestre se asemejaría a un inmenso invernáculo, en el que las condiciones climáticas necesarias para una vegetación exuberante se extenderían incluso hasta las regiones polares.»

Espiritualismo

«El profesor Pepper ha estado realizando, durante el invierno pasado, una gran labor ante los miles de personas que cada noche visitan el Instituto Politécnico de Londres. Además de exponer los últimos descubrimientos sobre electromagnetismo, luz y otros fenómenos, disertó acerca de las manifestaciones espirituales y señaló las profundas imposturas de las que ha sido víctima el público en nombre del mesmerismo y del espiritualismo. Sus conferencias las ilustra con sorprendentes ilusiones, tales como sombreros, mesas, e incluso damas entradas en carnes, que flotan en el aire. Él hace no solo cuanto han simulado hacer los espiritualistas, sino mucho más, pero con la diferencia de que él explica cómo lo logra.»

Trabajar la fruta

«La preparación de la fruta para uso culinario o hacer conservas es una tarea monótona y aburrida, al menos la operación de extraer pepitas y huesos. Facilitar esta labor y hacerla menos pesada es el propósito del invento procedente de Illinois, del ingenioso y pequeño utensilio que se muestra en el grabado. Nunca falla cuando extrae semillas de cereza, pasas, uvas o arándanos, dejando el fruto en un estado excelente sin aplastarlo ni golpearlo.»



1868: Deshuesar cerezas es una tarea fastidiosa. Se supone que este invento se ideó para aligerarla.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XVIII, N.º 19, 9 DE MAYO DE 1868



BIOLOGÍA MARINA

Mixótrofos marinos

Aditee Mitra

Organismos del plancton que cazan como animales y crecen como plantas pueden alterarlo todo, desde las poblaciones de peces hasta el ritmo del cambio climático.

CAMBIO CLIMÁTICO

Colapso ártico

Jennifer A. Francis

El clima ártico bate continuos récords y altera la meteorología del resto del planeta.

ASTRONOMÍA

El misterio de las explosiones rápidas de radio

Los astrónomos se afanan en descubrir qué causa unos potentes estallidos de radiación electromagnética en el cosmos distante. ¿Hay nueva física detrás?



MEDICINA

El árbol del cáncer

Jeffrey P. Townsend

Estudios evolutivos señalan que los cambios genéticos que activan el desarrollo del cáncer surgen mucho antes de lo esperado en el tumor primario.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Bruna Espar Gasset
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN
EDITOR IN CHIEF AND SENIOR VICE PRESIDENT Mariette DiChristina
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek



DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Prensa Científica, S. A.
Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO
Asesoramiento y traducción:
Javier Grande: *Apuntes, Sombras de otros mundos* y *La economía energética de la bicicleta*; Andrés Martínez: *Apuntes*; José Óscar Hernández Sendín: *Robots autodidactas* y *La isla de los pesos pesados*; Teresa Piñel: *Catedrales, símbolos de poder*; Ignacio Navascués: *Las glándulas gástricas, de perfil*; Alfredo Marcos: *La filosofía de las ciencias sociales*; Sara Arganda: *Tratamientos basados en neuroimágenes*; Lorenzo Gallego: *Nuevos medios de reproducción*; Fabio Teixidó: *El tribalismo de la verdad*; Anna Romero: *La temible dentellada de los cocodrilos*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España